



HAL
open science

La propagation dans les bandes des 20 et 30 GHz : bilan et perspectives offertes par le programme OLYMPUS

J.P. Mon, T. Ben-Meriem, J. Lavergnat

► To cite this version:

J.P. Mon, T. Ben-Meriem, J. Lavergnat. La propagation dans les bandes des 20 et 30 GHz : bilan et perspectives offertes par le programme OLYMPUS. [Rapport de recherche] Note technique CRPE n° 161, Centre de recherches en physique de l'environnement terrestre et planétaire (CRPE). 1988, 89 p. hal-02191393

HAL Id: hal-02191393

<https://hal-lara.archives-ouvertes.fr/hal-02191393>

Submitted on 23 Jul 2019

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

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

RP 256/18

**CENTRE NATIONAL D'ETUDES
DES TELECOMMUNICATIONS**

**CENTRE NATIONAL DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

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

CRPE

**NOTE TECHNIQUE
CRPE/161**

IV

**LA PROPAGATION DANS LES BANDES
DES 20 ET 30 GHZ : BILAN ET PERSPECTIVES
OFFERTES PAR LE PROGRAMME OLYMPUS**

Par A. R. ...

J.P. MON, T. BEN-MERIEM et J. LAVERGNAT



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

18 AVR. 1989

DB 107877

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/161

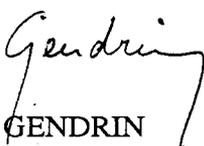
**LA PROPAGATION DANS LES BANDES DES 20 ET 30 GHZ :
BILAN ET PERSPECTIVES OFFERTES PAR LE
PROGRAMME OLYMPUS**

par

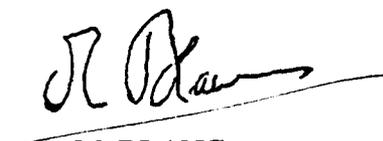
**J.P. MON, T. BEN-MERIEM et J. LAVERGNAT
RPE/ETP**

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

Le Directeur


R. GENDRIN

Le Directeur Adjoint


M. BLANC

Avril 1988

LA PROPAGATION DANS LES BANDES DES 20 ET 30 GHZ:

BILAN ET PERSPECTIVES OFFERTES PAR LE
PROGRAMME OLYMPUS

par

J.P. MON, T. BEN-MERIEM et J. LAVERGNAT

CNET/PAB/CRPE

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
I - LES SATELLITES UTILISES POUR LES ETUDES DE PROPAGATION	3
II - LES MESURES D'AFFAIBLISSEMENT	5
1 - Les mesures directes	6
1.1 Distributions cumulatives	6
1.2 Marges des équipements	7
1.3 Variation de l'affaiblissement en fonction de l'élévation	7
1.4 Variations diurnes des affaiblissements	8
1.5 Durée et espacement temporels des affaiblissements	9
1.6 Corrélations à 20/30 GHz	10
2 - Prévision des affaiblissements à partir des intensités de pluie	11
2.1 Bases théoriques	11
2.2 Prévision à partir des intensités mesurées au sol	13
2.2.1 La méthode du CCIR	15
2.2.2 La méthode de Leitao et Watson	17
3 - Prévision des affaiblissements à l'aide de radars	19
4 - Prévision à l'aide de radiomètres	21
4.1 Les radiomètres solaires	22
4.2 Les radiomètres fixes	22
4.3 Affaiblissement sur un trajet oblique : comparaison des mesures directes et radiométriques	23
4.4 Etalonnage en ciel clair	26
4.5 Etalonnage en présence de précipitations	26
III - LA DEPOLARISATION DES ONDES	27
1 - La dépolarisation due à la pluie	28
1.1 Résumé de la théorie	28
1.2 Mesures de la dépolarisation	29
1.3 Prévision des découplages	29
2 - La dépolarisation due à la glace	30
IV - LES SCINTILLATIONS TROPOSPHERIQUES	32
1 - Introduction	32
2 - Statistiques d'amplitude	33
3 - Occurrence	34
4 - Spectre des scintillations	34
4.1 Amplitude	34
4.2 Phase	35
5 - Paramètres de la liaison influençant les scintillations	35
5.1 Polarisation	35
5.2 Angle d'ouverture	35
5.3 Angle d'élévation	36
5.4 Fréquence	36

6 - Eléments théoriques	37
6.1 La turbulence faible	37
6.2 Modèle déterministe	40
7 - Conclusions	41
V - QUELQUES REMEDES	42
VI - BILAN SUCCINCT	44
VII - PERSPECTIVES	46
7.1 Le programme OLYMPUS	46
7.2 Le programme de recherches de PAB	47
7.3 Objectifs	50
REFERENCES	51
TABLEAUX	59
FIGURES	69

INTRODUCTION

Les performances des systèmes de télécommunication par satellite sont, dans une très large mesure, tributaires des effets de propagation des ondes dans l'atmosphère. Ces effets dépendent de la fréquence, de la climatologie et de la géographie locales, du type de transmission et de l'angle d'élévation du satellite. Ils sont d'autant plus complexes à étudier que les phénomènes qui leur donnent naissance sont par nature aléatoires. Ce qui conduit à introduire des méthodes statistiques dans l'évaluations de leurs effets sur les performances des systèmes. Sauf exceptions notables, ces effets sont plus importants lorsque la fréquence est élevée et que l'angle d'élévation est faible.

Même des conditions d'apparent " ciel clair" peuvent provoquer des dégradations des ondes transmises:

- les gaz présents dans l'atmosphère, notamment l'oxygène et la vapeur d'eau, peuvent réduire par absorption l'amplitude des signaux émis;
- la turbulence ou des variations rapides de température le long du trajet radioélectrique peuvent créer des scintillations d'amplitude et de phase ou des dépolarisations;
- les nuages, le brouillard, la poussière, le sable ou même une forte pollution atmosphérique peuvent être à l'origine de perturbations sensibles.

Cependant, aux fréquences supérieures à 10 GHz ce sont les hydrométéores qui, par absorption et diffusion, créent les perturbations les plus importantes (affaiblissements, dépolarisations, scintillations, diminution du gain des antennes, réduction de la largeur de bande de cohérence,...).

Pour des fréquences encore plus élevées (supérieures à environ 15 GHz), l'atténuation due aux nuages et l'absorption par les gaz atmosphériques (l'oxygène mais surtout la vapeur d'eau), peuvent provoquer des affaiblissements variant lentement qui interdisent toute détermination précise du niveau de référence, (0 dB), la simple mesure du niveau du signal avant et après un "événement" n'étant plus suffisante.

L'incertitude sur le niveau de référence intervient de façon décisive sur la précision des mesures d'affaiblissement, le problème étant d'autant plus crucial que l'on s'intéresse à des grandeurs dont la détermination implique des mesures simultanées d'affaiblissements (rapports d'isolation de polarisation, gain de diversité d'emplacement, lois de similitude en fréquence, corrélations d'affaiblissements à plusieurs fréquences,...).

C'est pourquoi le groupe OPEX* s'est fixé pour ses futures mesures d'affaiblissement à 20 et 30 GHz une précision (ambitieuse) de 0,1 dB (1). Le comportement aléatoire des phénomènes considérés implique de très longues campagnes de mesures pour aboutir à des statistiques

* Acronyme désignant l'ensemble des utilisateurs du module de propagation emporté par le satellite OLYMPUS de l'Agence Spatiale Européenne.

raisonnablement fiables. C'est pourquoi, afin d'élargir la base de données acquises par des mesures directes, il est intéressant de pouvoir disposer de modèles de prévision basés sur les mesures pluviométriques accumulées depuis de très longues années par les services météorologiques. Nous nous intéresserons donc aussi dans ce qui suit aux "auxiliaires" météorologiques associés aux mesures radioélectriques directes.

Dans ce document, nous nous proposons tout d'abord de dresser un bilan succinct de nos connaissances sur la propagation des ondes dans les bandes des 20 et 30 GHz sur les trajets satellites-Terre, ensuite d'examiner les perspectives d'amélioration de nos connaissances qu'apporte le programme **OLYMPUS** de l'Agence Spatiale Européenne.

Nous examinerons donc:

- les différents programmes d'études de propagation à 20 et 30 GHz effectués jusqu'à ce jour à l'aide de satellites géostationnaires;
- les diverses données d'affaiblissements obtenues directement, ou indirectement (pluviométrie au sol, radiométrie, radar-pluviométrie);
- les données sur la dépolarisation des ondes et leurs conséquences sur les performances des systèmes et les remèdes envisageables;
- les scintillations et leurs effets sur les systèmes.

Puis, après une brève présentation du programme Olympus, nous décrirons les mesures à mettre en oeuvre pour nous fournir les données nécessaires à la planification des liaisons satellite-Terre dans les bandes des 20 et 30 GHz.

I - LES SATELLITES UTILISES POUR DES ETUDES DE PROPAGATION

Leurs principales caractéristiques sont résumées dans le **Tableau I**.

ATS-5: Son intérêt est essentiellement historique. Sa mission principale (2) était la collecte de données destinées à évaluer la qualité des méthodes de prévision des affaiblissements à partir des mesures d'intensité de pluie au sol, de réflectivité radar ou de la température de brillance du ciel mesurée à l'aide de radiomètres à 35 et 16 GHz. Le dispositif expérimental permettait des mesures d'amplitude et de phase sur deux canaux indépendants, respectivement à **15,3 GHz** (liaison descendante) et **31,65 GHz** (liaison montante). Dans la bande des 30 GHz, qui seule nous intéresse ici, le signal test comporte une porteuse polarisée linéairement et deux bandes latérales symétriques par rapport à la porteuse et pouvant être positionnées, au choix, à + 1, + 10 ou + 50 MHz. Les mesures étaient effectuées à bord du satellite et retransmises à l'une des stations de poursuite où elles étaient traitées. Deux stations terriennes de la N.A.S.A. (Rosman, N.C. et Greenbelt, Md) ont participé aux mesures à 35 GHz. Ces mesures n'ont pu être effectuées que pendant **127 heures**. (On peut d'ailleurs s'interroger sur leur qualité car le satellite a été continuellement animé d'un mouvement de spin dû à une mauvaise mise à poste). La station de Greenbelt disposait d'un réseau de pluviomètres sur lequel nous reviendront plus loin.

ATS-6: C'est le second satellite lancé par la N.A.S.A. emportant des balises permettant des mesures dans les bandes des **20 et 30 GHz**. Lancé en Mai 1974, les expériences de propagation en ondes millimétriques ne constituaient qu'un des objectifs secondaires de la mission (3). Durant sa première année de vie, il a été positionné à 94° ouest de longitude. C'est pendant cette période qu'ont été effectuées les mesures de propagation aux Etats-Unis où 11 stations terriennes, concentrées, à une exception près, dans la partie Est du territoire, ont participé à l'expérience qui permettait d'effectuer des mesures d'affaiblissement, de dépolarisation et de cohérence de bande. Des mesures en diversité d'emplacement ont été faites à 20 GHz avec 4 stations situées autour de Washington, (D.C.), et à 30 GHz avec 3 stations réparties autour de Columbus, (Oh). La station de Rosman, (N.C.), appartenant à la N.A.S.A., était équipée de radiomètres à 20,270 et 30,270 GHz. A une exception près, toutes les stations disposaient de pluviomètres. Les autres missions d'ATS-6 étant prioritaires, les stations terriennes ont toutes fonctionné **sur alerte** et ont ainsi manqué de nombreuses périodes de pluie. Au total, **1140 heures** de mesures ont été effectuées aux Etats-Unis entre Juillet 1974 et Juin 1975.

En Juin 1975 le satellite a été repositionné à 35° de longitude Est, ce qui a permis aux Européens d'effectuer à leur tour, et pour la première fois, des mesures de propagation millimétriques (4). Au total, les européens ont pu disposer de **1600 heures** de mesures à 20 GHz et de **1750 heures** à 30 GHz, par "sessions" de 4 heures.

Certains pays ont pu continuer à faire des mesures à 30 GHz, jusqu'en Octobre 1976, pendant environ 350 heures, lors du déroutement du satellite vers sa position définitive à 105° Ouest.

Il faut aussi remarquer que 1975-76 a été, en Europe, une période de faible pluviosité.

COMSTAR D1 et COMSTAR D2: Ces deux satellites de la COMSAT ont été lancés respectivement en Mai et Juillet 1976 (5). Ils comportaient deux balises à **19,04 GHz**, en **polarisation linéaire commutée** à 1 kHz et à **28,56 GHz**, en polarisation linéaire "verticale", **modulée en phase** avec deux bandes latérales à + 270 MHz. C'est l'expérience la plus complète jusqu'à ce jour. Elle permet, entre autres choses, de déterminer complètement la matrice de transfert de l'atmosphère à 20 GHz. C'est aussi la première expérience permettant d'acquérir des données en continu sur une longue période.

Une dizaine de stations, situées pour la plupart dans l'Est des Etats-Unis, ont participé, à des degrés divers, aux mesures de propagation. En plus des équipements classiques de pluviométrie, certaines disposaient de radars météorologiques et de radiomètres. Des mesures en diversité d'emplacement ont été effectuées sur certains sites.

Ces deux satellites étaient vus des diverses stations sous des angles d'élévation différents, ce qui a permis de tester la loi en $1/\sin\theta$ de variation des affaiblissements en fonction de l'élévation.

ETS II: Lancé en Février 1977 et positionné à 130° Est, c'est le premier satellite géostationnaire japonais (6). Sa mission était de fournir les données de propagation nécessaires à l'établissement des futures liaisons spatiales japonaises. Le satellite emportait trois balises cohérentes, respectivement à 1,7 , 11,5 et **34,5 GHz** en polarisation circulaire.

Environ **3000 heures** d'enregistrement ont été effectués jusqu'en Août 1977 à la station de Kashima qui comportait un radar en bande C, un radiomètre à 35,2 GHz et des équipements météorologiques classiques.

CS: C'est un satellite de télécommunications **pré-opérationnel** japonais lancé en Décembre 1977 (7). Sa charge utile comprend deux répéteurs en bande C et six répéteurs en bande K dont les fréquences sont comprises entre **17,7 et 21,2 GHz** pour la liaison montante et entre **27,5 et 30,0 GHz** pour la liaison descendante. Une de ses missions était la mesure et l'évaluation des caractéristiques de propagation dans la bande des **20-30 GHz**. Outre la station principale de Kashima, cinq petites stations ont participé aux mesures de propagation.

COMSTAR D3 et D4 : Ces deux satellites ont les mêmes caractéristiques radioélectriques que les COMSTAR D1 et D2 mais leur localisation sur l'orbite est différente, ce qui donne une possibilité supplémentaire de vérifier la loi en $1/\sin\theta$, D4 ayant à 1° près la même position que D1.

II- LES MESURES D'AFFAIBLISSEMENT

L'établissement de statistiques d'affaiblissement à partir de balises embarquées sur des satellites géostationnaires est difficile car le satellite varie en attitude et en position sur son orbite, les stations terriennes n'effectuent pas un pointage parfait et les fortes variations de température auxquelles sont soumises les antennes du satellite toutes les douze heures créent inévitablement des variations de P.I.R.E., surtout en bord de couverture. Il faut donc obligatoirement corriger les données fournies par les balises.

De plus, comme nous l'avons vu dans l'introduction, aux fréquences supérieures à environ 15 GHz, l'atténuation due aux nuages et l'absorption par les gaz introduisent des incertitudes sur le niveau de référence.

Une autre difficulté majeure à laquelle on se trouve confronté lorsqu'on veut établir une statistique des affaiblissements dépassés pendant de faibles pourcentages du temps est la très grande variabilité d'une année sur l'autre. Ce qui implique de très longues campagnes de mesure pour collecter un échantillon de données significatif et pour établir des statistiques raisonnablement fiables (5 ans minimum).

En plus des habituelles **distributions cumulatives**, les concepteurs de systèmes ont besoin d'autres données statistiques: en effet, si les distributions cumulatives des affaiblissements dûs à la pluie permettent de se faire une idée des **marges** nécessaires pour satisfaire aux critères de qualité d'une liaison, dans les systèmes dans lesquels on a prévu une **compensation des affaiblissements par contrôle des puissances** montantes ou descendantes, ou encore par **diversité d'emplacement**, il faut disposer de statistiques sur la **durée des affaiblissements** et sur les **intervalles de temps** qui séparent deux affaiblissements de niveau donné. Il est en effet évident que les conséquences d'un grand nombre de coupures de courte durée sont différentes de celles d'un petit nombre de coupures de longue durée. En particulier, si la probabilité qu'il y ait un grand nombre de coupures de faible durée était élevée, cela pourrait diminuer considérablement la qualité des services exigeant de longues périodes de fonctionnement, tels que la téléconférence ou les communications interactives homme-machine. La **répartition diurne** des affaiblissements a aussi un impact important sur la qualité du service: en effet, à critères de qualité égaux, les coupures dues à la pluie sur les liaisons par satellites sont plus perturbatrices que les coupures provoquées par les trajets multiples sur les liaisons terrestres parce que, d'une part, les trajets multiples se

produisent la plupart du temps tôt le matin, c'est à dire en période de faible trafic téléphonique et que, d'autre part, étant sélectifs en fréquence, ils n'affectent pas au même instant l'intégralité de la bande; par contre, 35% environ des coupures dues à la pluie se produisent pendant des périodes de forte activité téléphonique et affectent au même instant toute la bande allouée à la liaison.

Dans ce qui suit nous nous intéresserons successivement aux **mesures directes**, c'est à dire aux mesures effectuées à l'aide de balises embarquées, aux **mesures indirectes** (radiométriques), aux **méthodes de prévision** à partir de statistiques d'intensité de pluie, puis aux **remèdes possibles** tels que la **diversité d'emplacement** ou le **contrôle de la puissance**.

1 - LES MESURES DIRECTES

1-1 Distributions cumulatives

Les premières mesures directes d'affaiblissement dans les bandes des 20-30 GHz sur des trajets Satellites-Terre ont été effectuées à partir de 1969 à l'aide des balises embarquées sur les satellites dont les caractéristiques ont été résumées dans le tableau I.

Pour les Etats-Unis et le Japon, les affaiblissements à 20 GHz et à 30 GHz dépassés pendant des pourcentages donnés du temps, sont donnés, respectivement dans les **Tableaux II et III**, tirés de (8) et (9).

On voit que, sans parler des expériences "sur alertes" effectuées à partir d'ATS-5 et d'ATS-6, les campagnes de mesures les plus longues n'ont jamais (sauf dans le cas de CS) dépassé deux ans, ce qui très insuffisant pour fournir des statistiques raisonnablement fiables, compte tenu de la grande variabilité annuelle des précipitations qui peut conduire à des probabilités d'affaiblissements de 10 dB variant dans un rapport de 1 à 4 (10).

Un certain nombre de résultats n'apparaissent pas dans ces tableaux, comme, par exemple, le fait que les affaiblissements mesurés en polarisation horizontale sont en général supérieurs de 1 à 2 dB aux affaiblissements mesurés en polarisation verticale (11),(12).

D'autre part, dans toutes les mesures d'affaiblissement décrites plus haut, le niveau de référence a toujours été fixé par interpolation entre la valeur du niveau "beau temps" avant et après un événement, ce qui, comme nous l'avons signalé dans l'introduction, peut conduire à une très grande incertitude sur la valeur de l'affaiblissement.

Un résultat généralement accepté est que la probabilité conditionnelle des affaiblissements suit une loi log-normale.

En ce qui concerne l'Europe, on ne dispose que de quelques résultats fragmentaires auxquels il ne faut d'ailleurs attribuer qu'une valeur indicative compte tenu des conditions dans lesquelles ils ont été acquis. Ils sont donnés en annexe dans les **Tableaux IV et V**.

1-2 Marges des équipements

Les distributions cumulatives des affaiblissements observés en divers sites aux **Etats-Unis** conduisent aux marges proposées dans le tableau ci-dessous(8)

Fiabilité de la liaison (%)	Coupure par an (heures)	Marges en dB	
		20 GHz	30 GHz
99,5	44	3	6
99,9	8,8	10	20
99,95	4,4	20	> 30
99,99	0,88	> 30	--

A partir des mesures effectuées pendant un an (Mai 77 - Avril 78) avec ETS-II, les Japonais proposent pour Kashima, à 34,5 GHz:

- 4 dB pour 99% du temps,
- 19,5 dB pour 99,9 %.

1-3 Variations de l'affaiblissement en fonction de l'élévation

Les résultats obtenus dans les diverses expériences montrent que, au moins en ce qui concerne les angles supérieurs à 10°, le rapport des affaiblissements (exprimés en dB) pour des angles d'élévation θ_1 et θ_2 mesurés à partir de l'horizon, est inversement proportionnel au rapport des sinus des angles d'élévation:

$$A(\theta_1) / A(\theta_2) = \sin \theta_2 / \sin \theta_1 \quad (1)$$

Cette relation n'est valable que pour des distributions cumulatives s'étendant au moins sur une année. Elle n'est en aucun cas applicable à des événements isolés, comme des orages (11).

1-4 Variations diurnes des affaiblissements

On dispose d'un certain nombre de données, quelquefois contradictoires, pour le Japon et les Etats-Unis :

1-4-1 Japon

On observe à 34,5 GHz (ETS II) des variations diurnes très importantes, la plupart des fortes pluies se produisant (à Kashima) dans la soirée, dans la nuit ou tôt le matin. (L'année 1977-78 pendant laquelle ont été faites les mesures n'est cependant pas tout à fait représentative de la climatologie locale).

A 19,5 GHz, les mesures effectuées à partir de CS ont permis d'établir l'histogramme de la distribution diurne des affaiblissements de 1, 2, 5 et 10 dB pour une durée de 2 ans. Les variations ne sont pas très marquées.

1-4-2 Etats-Unis

De nombreuses études ont été effectuées par la Bell Telephone à Holmdel (New-Jersey) (10),(11), par la Comsat à Clarksburg (Maryland) (12), par J. Goldhirsh de l'Université Johns Hopkins sur les données recueillies à Wallops Island (Virginie) (13)...

Les variations diurnes sont importantes, les Etats-Unis subissant en été une activité orageuse intense l'après-midi.

A 19 GHz, un an de données ont été traitées (14) par bloc de deux heures pour des affaiblissements de 4,5 - 9,5 - 19,5 et 34,5 dB. On observe peu de variations à 4,5 dB tandis que pour des affaiblissements plus profonds on a une distribution qui présente des pics l'après-midi et en début de soirée. Dans un souci d'efficacité économique, les auteurs ont affiné leurs distributions diurnes en distinguant la période 9-17 heures qui correspond aux heures d'ouverture des bureaux et la période 13-17 heures pendant laquelle se font la plupart des appels téléphoniques de la côte Est vers la côte Ouest. La comparaison de ces distributions (**figure 1**) montre que la période 13-17 heures subit des affaiblissements pouvant dépasser de plus de 20 dB ceux de la distribution journalière globale alors que la période "d'ouverture des bureaux" est deux fois plus affectée que la distribution globale. **Il semble que ces effets soient indépendants de l'angle d'élévation.**

A 29 GHz (13), sur un an, la plupart des affaiblissements supérieurs à 20 dB se produisent entre 12 et 20 heures. Pour cette profondeur d'affaiblissement, la distribution journalière est très fortement marquée par la distribution pendant les mois d'été.

La distribution journalière à 29 GHz, observée à Wallops Island (13), sur une durée de trois ans pour des créneaux horaires de 4 heures, fait apparaître un pic dans l'intervalle 12-16 heures et un minimum dans le créneau 04-12 heures. On note sur la **figure 2** une très grande variabilité d'une année à l'autre.

1-5 Durée et espacement temporel des affaiblissements

La **figure 3**, représentant un événement idéalisé, permet de préciser ce que l'on entend par durée et espacement temporel des affaiblissements (15).

On appelle durée d'un affaiblissement le temps pendant lequel un niveau donné d'affaiblissement est dépassé (T_{F1} et T_{F2} sur la figure). Un espacement temporel est un intervalle de temps continu pendant lequel l'affaiblissement ne dépasse pas le seuil fixé (T_{I1} et T_{I2} sur la figure). En fait, lorsque la pente de l'affaiblissement est faible, un espacement tel que T_{F1} peut être dû au bruit ou à des erreurs de numérisation. Pour corriger cet effet, on peut introduire (15) dans la détection de la fin de l'événement une hystérésis H , légèrement supérieure aux erreurs expérimentales. (L'introduction de H permet d'ailleurs de mieux modéliser les coupures subies par une liaison radio car, très souvent, les boucles à verrouillage de phase ont besoin pour réacquérir le signal, d'un niveau plus élevé que celui qui a provoqué le décrochage). Il semble qu'une hystérésis de 1 dB constitue une valeur raisonnable. Un exemple des durées d'affaiblissement à 19 GHz, observées pendant deux ans (Juin 76- Juin 78) à Crawford Hill est donné sur la **figure 4**. Pour des profondeurs d'affaiblissement allant de 5 à 40 dB, la durée médiane est comprise entre 2,8 et 7,5 minutes.

Peu d'affaiblissements d'une durée supérieure à 30 minutes ont été observés. On note qu'environ 10% des affaiblissements ont des durées supérieures à plus de cinq fois la valeur médiane, quelle que soit leur profondeur. L'effet de l'hystérésis est visible sur les courbes relatives aux faibles affaiblissements mais disparaît pour les affaiblissements supérieurs à 20 dB. On retrouve le même comportement dans les distributions des espacements temporels qui sont pratiquement horizontales pour les affaiblissements égaux ou supérieurs à 20 dB.

La plupart des espacements entre affaiblissements de plus de 20 dB dépassent six heures. La valeur médiane des espacements temporels avec hystérésis est égale à 31 minutes à 5 dB et à 46 minutes à 10 dB. 80% au moins des affaiblissements de plus de 40 dB sont séparés par plus de deux heures, contre seulement 35% des affaiblissements à 5 dB.

Le même type d'analyse a été fait par Kumar (12), à Clarksburg, à 19 et 29 GHz. Les résultats sont en accord avec ceux qui viennent d'être décrits et sont résumés dans le **Tableau VI**. On note que le nombre des affaiblissements à 29 GHz est à peu près le double de celui à 19 GHz et que la durée moyenne des affaiblissements a tendance à décroître lorsque l'angle d'élévation augmente. Le rapport des durées des affaiblissements de profondeur donnée à deux fréquences est très voisin de celui des affaiblissements et sensiblement égal au rapport du carré des fréquences. Le rapport des durées des affaiblissements à deux angles d'élévation varie

comme le rapport de ces affaiblissements avec l'angle d'élévation. La durée moyenne des affaiblissements dépend à la fois de l'élévation et de la fréquence.

La compilation des données diverses obtenues en 10 ans aux Etats-Unis a conduit Lin et ses collaborateurs (10) à conclure que :

- les durées des affaiblissements dépassant un seuil donné sont distribuées à peu près suivant une loi log-normale ;
- la durée moyenne des affaiblissements supérieurs à 25 dB est de l'ordre de 3 minutes (à Palmetto) ;
- 23% des affaiblissements ont une durée supérieure à la durée moyenne ;
- la probabilité qu'une coupure ait une durée supérieure à 10 fois la durée moyenne est égale à 1%.

1 - 6 Corrélations des affaiblissements à 20 et 30 GHz

Ces corrélations présentent un double intérêt :

- lorsqu'elles sont établies événement par événement, elles peuvent donner des indications sur la distribution des dimensions des diffuseurs ;
- lorsqu'elles sont établies statistiquement, elles permettent de trouver des lois de similitude en fréquence.

Les mesures effectuées avec ATS-6, tant en Europe qu'aux Etats-Unis, n'autorisent que des comparaisons par événements : elles varient beaucoup d'un événement à l'autre et même au cours d'un même événement (3), (4).

Une corrélation statistique sur un an a été effectuée par Cox et al. (11) à partir des données fournies par Comstar D2 : une simple loi en f^2 permet de passer des affaiblissements à 19 GHz à ceux à 29 GHz, jusqu'à des profondeurs d'affaiblissements atteignant 30 dB à 30 GHz.

Pour des statistiques effectuées sur de longues durées, le C.C.I.R. (16) recommande de prendre la relation :

$$A_1 / A_2 = g(f_1) / g(f_2) \quad (2)$$

$$\text{où} \quad g(f) = f^{1,72} / (1 + 3 \times 10^{-7} (f^{1,72})^2) \quad (3)$$

et où A_1 et A_2 sont les valeurs équiprobables des affaiblissements exprimés en dB et f_1 et f_2 les fréquences en GHz. Cette relation a été testée à l'aide de la banque de données établie dans le cadre de l'Action COST 205 (17) pour les bandes de fréquences 11,8/14,5 et 11,6/17,8 GHz. Elle donne des résultats suffisants pour répondre aux exigences de la mise en oeuvre du contrôle

de la puissance montante. Elle demande cependant à être vérifiée dans la bande des 20/30 GHz.

Notons qu'une autre méthode d'établissement des lois de similitude en fréquence a été proposée par Holt et ses collaborateurs (18) à partir de la détermination à l'aide d'un radar à deux polarisations du nombre et de la distribution des dimensions des gouttes de pluie.

2 - PREVISION DES AFFAIBLISSEMENTS A PARTIR DES INTENSITES DE PLUIE

La durée relativement courte des expériences et l'extension nécessairement limitées des zones dans lesquelles on peut faire des mesures de propagation à l'aide de satellites conduisent, pour l'évaluation des marges à utiliser des modèles de prévision des affaiblissements basés sur des statistiques à long terme des intensités de pluie. Depuis quelques années, de nombreux modèles de prévision ont été proposés (9),(19),...(25). Mais très souvent, les paramètres de ces modèles ont été ajustés, sans prendre en compte la réalité physique du milieu de propagation, de façon à donner le meilleur accord possible entre les valeurs des affaiblissements calculées et les valeurs mesurées dans des cas particuliers. Il est bien évident, dans ces conditions, que la mise en oeuvre de tels modèles en des lieux différents et pour des bandes de fréquences différentes peut conduire à des erreurs importantes.

Seuls des modèles fondés sur la physique du milieu peuvent être d'application générale. L'établissement de tels modèles fait appel à la combinaison de diverses techniques telles que la pluviométrie au sol, la radar-pluviométrie, la spectro-pluviométrie,...

Le grand intérêt du radar (26) tient à ses possibilités de localisation et, éventuellement, d'identification des diffuseurs. Il permet notamment, à partir de l'altitude de la bande brillante, de déterminer la hauteur H des précipitations qui intervient dans les modèles de prévision des affaiblissements. Il peut explorer un grand volume spatial, ce qui autorise, lorsqu'il a été convenablement étalonné, l'étude de la diversité d'emplacement et la prévision des affaiblissement pour des angles d'élévation quelconques. Enfin, l'utilisation de radars multi-paramètres (à deux fréquences ou à deux polarisations) permet d'affiner les modèles (27).

2-1 Bases théoriques

Le calcul classique de l'affaiblissement d'une onde par la pluie repose sur les trois hypothèses suivantes :

- l'intensité de l'onde décroît exponentiellement lorsqu'elle se propage dans la pluie ;

- les gouttes de pluie sont des sphères qui absorbent et diffusent une partie de l'énergie incidente ;
- les contributions de chacune des gouttes sont additives et indépendantes. (Cette dernière hypothèse suppose que l'on exclut le cas de la diffusion multiple.)

La puissance P_r transmise par une distribution volumique de gouttes d'eau sphériques, de même rayon r , distribuées uniformément sur une longueur L est donnée par

$$P_r = P_t e^{-kL} \quad (4)$$

où P_t désigne la puissance incidente et k le coefficient d'affaiblissement du milieu traversé. L'affaiblissement de l'onde dû à la traversée du milieu est donné en décibel par

$$A(\text{dB}) = 10 \log_{10} P_t/P_r \quad (5)$$

ou, en passant aux logarithmes népériens

$$A(\text{dB}) = 4,343 k L \quad (6)$$

On a aussi

$$k = \rho Q_t \quad (7)$$

où ρ est le nombre de gouttes par unité de volume et Q_t la section efficace d'affaiblissement d'une goutte. La valeur de Q_t dépend du rayon de la goutte, de la longueur d'onde λ et de l'indice de réfraction complexe m de la goutte. Q_t est la somme des sections efficaces de diffusion Q_s et d'absorption Q_a

$$Q_t(r, \lambda, m) = Q_s + Q_a \quad (8)$$

En fait, les gouttes de pluie n'ont pas toutes le même rayon et le coefficient d'affaiblissement s'obtient en intégrant sur l'ensemble des gouttes

$$k = \int Q_t(r, \lambda, m) N(r) dr \quad (9)$$

où $N(r)$ représente la distribution des dimensions des gouttes de pluie. En prenant $L = 1 \text{ km}$ les résultats précédent conduisent à

$$\alpha (\text{dB/km}) = 4,343 \int Q_t(r, l, m) N(r) dr \quad (10)$$

La théorie classique de Mie (28) permet de calculer Q_t sous la forme d'une série (29)

$$Q_t = (\lambda^2/2\pi) \sum (2n + 1) \operatorname{Re} (a_n + b_n) \quad (11)$$

où a_n et b_n sont les coefficients de diffusion de Mie, fonctions de r , λ et m .

L'équation précédente est difficile à calculer dans le cas général. On peut la simplifier dans le cas de l'approximation de Rayleigh ($2\pi r \ll \lambda$) qui est valable jusqu'à des fréquences de l'ordre de 40 ou 50 GHz. On trouve alors :

$$Q_t = (8\pi^2 / \lambda) r^3 \operatorname{Im} ((m^2 - 1)/(m^2 + 2)) \quad (12)$$

En ce qui concerne la distribution des dimensions des particules, de nombreux travaux expérimentaux ont conduit à prendre

$$N(r) = N_0 e^{-\Lambda r} = N_0 e^{-(cR-d)r} \quad (13)$$

où R est l'intensité de pluie exprimée en mm/h, N_0 , Λ , c et d sont des constantes déterminées à partir des distributions mesurées. Les trois distributions les plus couramment utilisées sont celles de Laws et Parsons (30), de Marshall et Palmer (31) et celle de Joss et Waldvogel (32). On peut écrire en utilisant ces distributions

$$\alpha \text{ (dB/km)} = 4,343 N_0 \int Q_t(r, \lambda, m) e^{-\Lambda r} dr \quad (14)$$

où Q_t est calculé à partir de (10) ou (11). Finalement, l'affaiblissement total sur le trajet de longueur L est donné par

$$A \text{ (dB)} = 4,343 \int (N_0 \int Q_t e^{-\Lambda r} dr) dx \quad (15)$$

En général Q_t et la distribution des dimensions des gouttes varient le long du trajet et il faut en tenir compte dans l'intégration. C'est un problème difficile.

On a l'habitude d'écrire (15) en abrégé sous la forme

$$A(\text{dB}) = \int \alpha dx \quad (16)$$

2-2 Prédiction des affaiblissements à partir des intensités de pluie mesurées au sol.

C'est la méthode la plus utilisée dans les études de propagation, d'une part, à cause de la relative facilité des mesures et d'autre part, parce qu'il existe dans la plupart des pays

industrialisés des banques de données pluviométriques établies depuis de nombreuses années par les services météorologiques qui permettent de faire des prévisions à long terme.

Toutes les formules de prévision des affaiblissements dus à la pluie sont basées sur la relation empirique de Gunn et East (33) donnant l'affaiblissement spécifique α (en dB/mm) en fonction de l'intensité de pluie R (en mm/h) :

$$\alpha = aR^b \quad (17)$$

où a et b sont deux paramètres qui prennent en compte la dépendance fonctionnelle complexe de la relation (15). (Des justifications théoriques de la relation de Gunn et East sont données en (34)).

Dans les gammes de fréquences qui nous intéressent et pour des gouttes sphériques, on peut prendre les valeurs ci-dessous (16).

Fréquences

(GHz)	a	b
20	0,0719	1,097
30	0,186	1,043

En réalité les gouttes de pluie ne sont pas sphériques mais ont des formes compliquées (35) suivant leurs dimensions, leurs vitesses de chute, le vent,... Ce qui provoque le phénomène de transpolarisation sur lequel nous reviendrons plus loin. On peut cependant calculer les valeurs que prennent les coefficients a et b par diverses méthodes généralisant celle de Mie. On trouve ainsi (16) pour des ondes incidentes polarisées horizontalement (h) ou verticalement (v)

Fréquence

(GHz)	a_h	a_v	b_h	b_v
20	0,0751	0,0691	1,099	1,065
30	0,187	0,167	1,021	1,000

A partir de (17), on calcule l'affaiblissement prévisible sur une liaison par :

$$A \text{ (dB)} = \alpha L(R) \quad (18)$$

où L(R) est la "longueur équivalente" de la liaison exprimée en km. L(R) dépend de l'intensité de pluie R et représente la portion de la liaison qui est affectée par la pluie. (Il ne faut pas la confondre avec l'étendue des cellules de pluie). **Son évaluation est difficile.** C'est elle qui fait la différence entre les diverses méthodes de prévision.

Ces méthodes sont extrêmement nombreuses et leurs performances sont souvent comparées (36),(37). Il est hors de question de les passer en revue ici. Nous nous bornerons à donner les grandes lignes de la méthode proposée par le C.C.I.R. (38) qui est très largement acceptée et régulièrement mise à jour et de la méthode proposée tout récemment par Watson et al. (39) qui s'applique plus particulièrement à l'Europe.

2-2-1 La méthode du C.C.I.R.

Partant de l'intensité de pluie $R_{0,01}$ observée pendant 0,01% du temps, on calcule l'affaiblissement dépassé pendant 0,01% du temps à partir de

$$A(\text{dB}) = \alpha L r \quad (19)$$

où L , longueur de la liaison à travers la pluie, est une fonction de la hauteur de la pluie, H , et de l'angle d'élévation de la liaison. Le paramètre r est un facteur de réduction qui permet de prendre en compte l'inhomogénéité de la pluie.

Le rapport 563 du C.C.I.R. décrit la procédure de calcul de la hauteur H des précipitations.

Pour des latitudes ϕ supérieures à 36° , le groupe 5 du C.C.I.R. propose :

$$H(\text{km}) = 4,0 - 0,075 (\phi - 36) \quad (20)$$

Une simple extrapolation à partir de $R_{0,01}$ permet de calculer les affaiblissements pour d'autres pourcentages du temps dans l'intervalle 0,001 - 1,0.

Cette méthode semble donner une erreur d'environ 10% pour les affaiblissements dépassés pendant 0,01% du temps si l'on utilise pour R des mesures effectuées localement. (Les erreurs deviennent plus importantes aux latitudes inférieures à 36° auxquelles nous ne nous intéresserons pas ici.)

Notons que le C.C.I.R. recommande d'effectuer les mesures d'intensité de pluie, localement, avec des temps d'intégration de 1 minute.

La précision de la méthode du C.C.I.R. semble avoir été tout récemment améliorée par Yamada et al. (37) par l'introduction d'une longueur caractéristique de pluie L_0 variable

$$L_0 = m e^{-nR_{0,01}} \quad (21)$$

où m et n sont des constantes.

Compte tenu de ces dernières améliorations, on peut donner la procédure suivante pour évaluer les affaiblissements à partir des intensités de pluie :

1 - Prendre la valeur de l'intensité de pluie $R_{0,01}$ (mm/h) dépassée pendant 0,01 % du temps sur le site choisi ;

2 - Calculer l'affaiblissement spécifique α (dB/km), $\alpha = aR_{0,01}^b$, où a et b sont donnés par le rapport 721 du C.C.I.R. ;

3 - Calculer la longueur L du trajet en fonction de l'angle d'élévation θ et de l'altitude H_S du site ;

$$L = (H - H_S) / \sin\theta \quad (\theta > 10^\circ) \quad (22)$$

où H est la hauteur équivalente de pluie est donnée par

$$\begin{aligned} H &= 4 \text{ km} && \text{pour } 0^\circ < \phi < 36^\circ \\ H &= 4 - 0,075 (\phi - 36) && \text{pour } \phi > 36^\circ \end{aligned}$$

ϕ étant la latitude du site.

4 - Calculer la longueur caractéristique L_0 de la pluie pour 0,01% du temps

$$L_0 = m e^{-nR_{0,01}} \quad (23)$$

avec $m = 35$ et $n = 0,015$ dans l'intervalle 10-20 GHz ;

5 - Calculer la longueur équivalente du trajet L_e ,

$$L_e = L / (1 + L \cos\theta / L_0) \quad (24)$$

6 - Calculer l'affaiblissement $A_{0,01}$ (dB) dépassé pendant 0,01% du temps,

$$A_{0,01} = \alpha L_e \quad (25)$$

7 - Calculer l'affaiblissement pour un pourcentage $p\%$ du temps,

$$A_p = 0,12A_{0,01} p^{-(0,546 + 0,043 \log p)} \quad (26)$$

pour $0,001 < p < 1$.

2 - 2 La méthode de Leitao et Watson (39)

L'intérêt de cette méthode tient à ce qu'elle n'implique aucune hypothèse a-priori sur la structure de la pluie mais qu'au contraire elle se fonde sur la microphysique des précipitations telle qu'elle peut être observée à l'aide d'un radar. C'est une méthode essentiellement physique. Le modèle qui en a été tiré n'a pas été ajusté ou corrigé après coup pour donner un bon accord avec les mesures directes d'affaiblissements.

Il a été testé dans la gamme 10 -18 GHz avec la base de données recueillies lors de l'Action COST 205 (17). Son fondement physique le rend cependant plus difficile à mettre en oeuvre que le modèle du C.C.I.R., mais il fournit, selon ses auteurs, des résultats plus précis (erreur moyenne inférieure à 5%, erreur quadratique moyenne inférieure à 25% sur les pourcentages de dépassement d'un seuil donné d'affaiblissement entre 0,01 et 0,1%).

Passant sur les développements qui conduisent aux diverses formules intervenant dans le modèle, on procède de la façon suivante:

1 - on calcule les affaiblissements spécifiques γ pour l'intensité de pluie R_p correspondant à un pourcentage p du temps à l'aide des formules:

$$\begin{aligned} \alpha(\text{dB/km}) &= a (R_p/20)^x && \text{pour } R_p < 20 \text{ mm/h} \\ \alpha(\text{dB/km}) &= a (R_p/20)^y && \text{pour } R_p > 20 \text{ mm/h} \end{aligned} \quad (27)$$

où les paramètres a , x et y sont donnés par

$$\begin{aligned} a &= (a_h + a_v + (a_h - a_v) \cos^2\theta \cos 2\tau) / 2 \\ x &= (a_h x_h + a_v x_v + (a_h x_h - a_v x_v) \cos^2\theta \cos 2\tau) / 2a \\ y &= (a_h y_h + a_v y_v + (a_h y_h - a_v y_v) \cos^2\theta \cos 2\tau) / 2a \end{aligned} \quad (28)$$

où τ est l'angle de polarisation repéré par rapport à l'horizontale et où

$$\begin{aligned} a_{h,v} &= s_{h,v} / (1 + 0,01L) && \text{pour } R_p = 20 \text{ mm/h} \\ x_{h,v} &= t_{h,v} \log_{10}(L + 1) + u_{h,v} \\ y_{h,v} &= v_{h,v} \log_{10}(L + 1) + w_{h,v} \end{aligned} \quad (29)$$

L étant la projection du trajet oblique sur le sol et les paramètres s, t, u, v, w étant donnés dans le **Tableau VII** pour divers types de pluies et en fonction de la fréquence et de la polarisation.

2 - on calcule l'affaiblissement à partir de la formule

$$A(\text{dB}) = \alpha H_r / \sin\theta \quad (30)$$

où

$$H_r = H_y + \Delta H_M \quad (31)$$

H_y étant la hauteur moyenne de la pluie pendant la saison des pluies, donnée en fonction de la latitude ϕ par

$$H_y(\text{m}) = 5800 - 72,6 \phi \quad (32)$$

et ΔH_M étant la variation moyenne mensuelle de cette hauteur de pluie. Les valeurs de ΔH_M sont données dans le **Tableau VIII**.

Ce modèle a été appliqué par Watson et al. (40) pour établir une carte des affaiblissements en Europe à partir d'un maillage de 40 x 40 km des intensités de pluie pour 0,01% et 0,1% du temps d'une "année moyenne". Une simple interpolation linéaire dans une maille permet d'obtenir ces intensités de pluie pour un site quelconque. A titre d'exemple, la **figure 6** donne le contour des affaiblissements à 20 GHz dépassés pendant 0,01% et 0,1% du temps dans le cas du futur satellite Olympus.

Remarques:

1 - Les intensités de pluie R utilisées dans les formules de prévision sont des valeurs ponctuelles et il est illusoire d'essayer de comparer seconde par seconde ou minute par minute les affaiblissements observés et les intensités de pluie mesurées. Il est plus significatif de comparer les "pics" d'affaiblissements avec les "pics" de pluie les plus rapprochés. Les résultats obtenus avec ATS-5 montrent que la dispersion des points obtenus dans cette comparaison diminue lorsque l'on utilise des moyennes d'intensités de pluie, les meilleurs résultats étant obtenus lorsqu'on prend l'intensité de pluie moyenne en hauteur. Parmi les dispositifs expérimentaux permettant d'effectuer de telles moyennes, celui mis en oeuvre à Rosman lors des expériences ATS-5 et ATS-6 nous a paru particulièrement intéressant: il comporte dix pluviomètres à augets basculant disposés le long de l'azimut de la liaison avec les espacements indiqués sur la **figure 7**.

L'intensité moyenne de pluie au sol est donnée par

$$R(0) = \Sigma R_n(0)/N \quad (33)$$

où N est le nombre de pluviomètres effectivement en service à l'instant de la mesure.

La moyenne des intensités de pluie en hauteur $R(h)$ est donnée par

$$R(h) = (1/10) \sum (1 - h_n/H) R_n(0) \quad (34)$$

On calcule les intensités de pluie (en mm/h) en divisant la hauteur d'eau accumulée dans un auget par le temps (en heure) qui sépare deux basculements. On obtient ainsi une résolution qui croît avec l'intensité de pluie et qui donne pratiquement des valeurs instantanées au dessus de 20 mm/h.

2- Nous avons laissé de côté les modèles "globaux" de prévision (41), (42), (43) qui permettent de calculer les affaiblissements dans de grandes zones climatiques, telles que celles qui sont définies par le C.C.I.R.

3 - Nous n'insisterons pas non plus sur les statistiques pour le mois le plus défavorable dont la définition, quelquefois un peu arbitraire, exige des statistiques de longue durée. Plusieurs formules ont été proposées pour passer des statistiques annuelles aux statistiques pour le mois le plus défavorable (44), (45). A 19,5 GHz, Fukuchi et al. (46) ont testé la méthode proposée par Brussaard (47) et ont trouvé un bon accord en ce qui concerne les affaiblissements. La figure 8, tirée de (46), illustre bien la nécessité de prendre en compte les statistiques du mois le plus défavorable pour évaluer les marges nécessaires à une liaison.

3 - PREVISION DES AFFAIBLISSEMENTS A L'AIDE DE RADARS

En se plaçant dans l'approximation de Rayleigh et dans le cas où la fréquence du radar est suffisamment basse pour que son affaiblissement soit négligeable, on montre que le facteur de réflectivité Z d'une distribution de diffuseurs est liée à l'intensité R des précipitations par

$$Z = kR^\gamma \quad (35)$$

où k et γ sont deux paramètres indépendants de la fréquence.

On peut donc relier l'affaiblissement spécifique α d'une liaison affectée par des précipitations au facteur de réflectivité Z par une relation du type

$$\alpha = cZ^d \quad (36)$$

où c et d sont deux paramètres qui dépendent de la fréquence de la liaison et des dimensions des diffuseurs. Si on connaît la température de la pluie, on peut réécrire l'équation du radar sous la forme

$$Z = r^2 P_r / C_r \quad (37)$$

où r est la distance du volume diffusant, C_r une constante caractéristique du radar et P_r la puissance moyenne rétrodiffusée (mesurée sur un grand nombre d'impulsions).

Remarque:

La mesure de P_r n'est pas facile à cause des fluctuations des cibles à l'intérieur du volume diffusant. En outre, l'existence de gradients de réflectivité dans ce volume peut conduire à des erreurs importantes: c'est ainsi, par exemple, que Mc Cormick (48) a trouvé à 15 GHz des affaiblissements calculés 2 à 6 fois plus grands que ceux effectivement mesurés. Deux cas peuvent couramment mener à ce type d'erreurs: celui où le faisceau radar intercepte la bande brillante (qui peut-être très large) dans le cas des pluies stratiformes et celui où il y a des cellules de grêle dans le volume diffusant (on peut trouver dans ce cas des facteurs de réflectivité supérieurs à 60 dBZ).

On peut dans les méthodes de prévision des affaiblissements utiliser le radar suivant deux "philosophies", c'est à dire:

- évaluer la hauteur de la bande brillante pour l'intégrer dans les méthodes de prévision basées sur les intensités de précipitations. (On obtient cette hauteur en mesurant l'altitude de la "cassure" observée dans les profils verticaux du facteur de réflectivité.) (49).

- essayer d'établir directement des distributions cumulatives d'affaiblissements. Dans ce dernier cas, on calcule l'affaiblissement instantané (en dB) à partir de la relation

$$A_R(t) = \sum \alpha_i \Delta r \quad (38)$$

où $\alpha_i = cZ^d$ est l'affaiblissement spécifique dans "la porte" i , Z_i le facteur de réflectivité dans la porte i , Δr la largeur de la porte, N le nombre de portes sur lequel on effectue la sommation.

(Lorsqu'on a affaire à des pluies stratiformes, on prend pour N le nombre de portes qui correspond à la hauteur de la bande brillante tandis que si l'on est en présence de pluies convectives on intègre jusqu'au nombre N correspondant à la portée maximale du radar).

Dans le cadre de l'expérience ATS-6 aux Etats-Unis, la station de Rosman était équipée de radars à 8,75 GHz et 3,0 GHz dont la portée maximale était de 25,6 km. Avec des portes de

100 mètres, la comparaison des affaiblissements mesurés et calculés conduit, respectivement pour ces deux radars, à des erreurs quadratiques moyennes de 1,3 dB et 2,0 dB à 20 GHz et de 3,0 dB et 2,4 dB à 30 GHz. Mais les travaux les plus importants ont été effectués par Goldhirsh (50) à Wallops Island avec un radar de 3 GHz. On observe un très bon accord entre affaiblissements mesurés et calculés, tant pour les comparaisons événement par événement que pour les statistiques cumulatives, à condition d'utiliser pour la distribution des dimensions des gouttes de pluie la distribution mesurée à l'aide de distromètres situés au voisinage du radar. (Si l'on prend la distribution de Marshall-Palmers, on trouve un bon accord uniquement pour les pluies d'automne et d'hiver. Ce qui peut s'expliquer par le fait qu'en Virginie, il y a toujours une bande brillante pendant les pluies d'automne et d'hiver mais jamais en été.)

REMARQUE: *On peut aussi utiliser des radars pour évaluer la distribution des dimensions des gouttes de pluie dans diverses portes de distance ce qui permet d'affiner considérablement les modèles de prévision (18).*

4 - PREVISION DES AFFAIBLISSEMENTS A L'AIDE DE RADIOMETRES

Avant que l'on ne dispose de balises embarquées sur satellites, la seule source de rayonnement de fréquences supérieures à 10 GHz, suffisamment intense, qu'on pouvait utiliser était le soleil. On a donc mis en oeuvre des radiomètres " solaires" pour évaluer l'affaiblissement sur des trajets obliques. Par définition, ces radiomètres ont une orientation variable puisqu'ils suivent le soleil dans sa course. On a ensuite utilisé des radiomètres passifs, plus simples, mais de dynamique plus faible, que l'on peut pointer dans une direction fixe pour simuler une liaison satellite-Terre.

Dès que l'on a pu disposer de signaux émis par des balises embarquées sur satellite, on a cherché à vérifier la précision des déterminations d'affaiblissement effectuées à l'aide de radiomètres travaillant soit à des fréquences voisines de celles des balises soit à des fréquences très différentes:

Dans le cas d'ATS-5 les corrélations observées entre affaiblissements mesurés et températures du ciel enregistrées à l'aide de radiomètres à faible ouverture sont très bonnes pour la grande majorité des orages.

Dans le cadre de la campagne européenne de mesures effectuées à l'aide d'ATS-6, les données collectées par Brussaard (51) entre 1969 et 1976 sur divers sites européens ont permis de calculer des affaiblissements en bon accord avec les affaiblissements directement mesurés,

l'accord étant particulièrement bon à 20 GHz (erreur de + 0,5) mais plus médiocre à 30 GHz, où on peut penser que l'affaiblissement dépend davantage de la dimension des gouttes de pluie.

Les mesures effectuées par les Japonais montrent aussi que l'on obtient un bon accord pour des affaiblissements allant jusqu'à 10 dB.

Aux Etats-Unis, les distributions cumulatives établies à l'aide de radiomètres avant le lancement des satellites COMSTAR ont aussi montré que l'on pouvait obtenir un accord satisfaisant jusqu'à des profondeurs de 10 dB. Notons que les mesures radiométriques effectuées en 1967-68 ont été intégrées dans les tableaux de prévision des affaiblissements proposés par Lin et al. (10), ce qui veut dire qu'il faut les utiliser avec circonspection.

Le point essentiel à retenir de ces comparaisons est qu'on peut utiliser des radiomètres pour effectuer des prévisions d'affaiblissement jusqu'à 10 dB., niveau qui peut être très largement dépassé à 20 et 30 GHz.

1 - Les Radiomètres solaires

Ils ont été exclusivement utilisés pour évaluer l'affaiblissement auquel on pouvait s'attendre sur des liaisons Satellite - Terre (52) (53) (54) (55) (56) (57).

Leurs antennes ont des diagrammes de rayonnement présentant un angle d'ouverture d'environ trois fois le diamètre angulaire du soleil, soit 1 degré (56)

Ils possèdent une très grande dynamique. En effet, du fait qu'ils utilisent le soleil comme source de référence, ils sont à même de mesurer de très grandes différences de températures : de 10000°K quand ils sont pointés vers le soleil à 50°K quand ils ne visent pas le soleil. On obtient facilement des dynamiques de 23dB voire plus (30 dB) (55)

Un autre de leurs avantages, non moins négligeable, est que l'affaiblissement que l'on déduit, tient compte à la fois de l'absorption et de la diffusion alors que l'équation de transfert radiatif du radiomètre "fixe" ignore les effets de la diffusion.

Dans la série des inconvénients, on peut citer essentiellement leur inaptitude à fournir des mesures en permanence car ils ne sont opérationnels que de jour. Par ailleurs, du fait que la mesure de l'affaiblissement s'effectue en deux temps (pointage vers le soleil et en dehors du soleil) cela impose deux angles d'élévation.

2 - Le radiomètre "Fixe"

Contrairement au radiomètre "Solaire", les mesures effectuées par le radiomètre "Fixe" se font en un seul temps et suivant un seul angle d'élévation car le radiomètre ne mesure que la température du ciel T_s . Il ne nécessite donc aucune source de référence de rayonnement (soleil ou autre) et par voie de conséquence, des mesures en permanence (de jour et de nuit) sont tout à fait possibles (58) (59).

Un tel radiomètre peut être un excellent outil pour les études statistiques de l'affaiblissement du trajet oblique quand une balise n'est pas disponible ou même en présence d'une balise que ce soit en site unique ou en diversité (56) (62) (66) .

Son inconvénient majeur est sa faible dynamique (10 dB) maximum.

3 - Comparaison des affaiblissements mesurés à partir d'une balise et déterminés à l'aide d'un radiomètre

La comparaison de l'affaiblissement du trajet oblique mesuré par balise à l'affaiblissement radiométrique se déduit du modèle de conversion suivant :

$$A = 10 \log \left(\frac{T_m - T_c}{T_m - T_s} \right) \quad (39)$$

Avec :

T_m : température du milieu (l'atmosphère)

T_c : température cosmique (3°K aux fréquences micro-ondes)

T_s : température du ciel (température radiométrique)

Dans ce modèle, l'atmosphère est supposée être un atténuateur pur et homogène (pas de diffusion). Cette comparaison doit se faire avec un radiomètre bien étalonné. En effet, dans ce modèle, T_m est un paramètre auquel on n'a pas directement accès. Il est très approximatif car l'atmosphère est loin d'être un milieu homogène.

Non seulement T_m dépend de la localité où est implanté la station mais aussi du type d'évènement car la nature physique du milieu responsable de l'évènement peut conduire à des phénomènes de propagation qui diffèrent d'un évènement à d'autres (60) (73) (17).

C'est pourquoi, seule une approche statistique sur la base de données engrangées sur plusieurs années d'observation peut permettre un étalonnage précis du radiomètre.

Les méthodes utilisées dans différentes expériences (OTS, ATS-6 ...) sont centrées autour des distributions conjointes. Pour chaque couple ($A-T_s$) affaiblissement balise et température radiométrique relatifs à un évènement (préalablement défini), on en déduit des courbes de distributions conjointes des deux paramètres (T_s-T_m) (61) (62).

Cette distribution conjointe permet d'effectuer une analyse plus détaillée et d'évaluer la précision d'étalonnage.

Il est bien évident que, la quantification des intervalles d'affaiblissement n'est pas sans conséquence sur la précision (58).

Si l'intervalle de quantification est, $(-\Delta, +\Delta)$, la valeur de l'affaiblissement correspond à un événement et tombant dans cet intervalle est équirépartie. La variance de la variable échantillon x est :

$$\sigma^2 = \int_{-\Delta}^{+\Delta} x^2 \frac{1}{2\Delta} dx = \frac{\Delta^2}{3} \quad (40)$$

L'écart type est alors :

$$\sigma = \frac{\Delta}{\sqrt{3}} \quad (41)$$

Supposons que T_s traduise parfaitement l'affaiblissement avec une valeur de T_m de 270°K, le biais dans les statistiques de l'affaiblissement balise conduit à une erreur sur T_m .

La nouvelle valeur $\langle T_m \rangle$ recherchée dépendra de Δ . On aura alors :

$$\Delta \text{ (dB)} = 10 \log \left(\frac{T_m}{T_m - T_s} \right) - 10 \log \left(\frac{270}{270 - T_s} \right) \quad (42)$$

Cette relation conduit à $\langle T_m \rangle$ en fonction de T_s ou de A avec Δ comme paramètre soit :

$$T_m = \frac{T_s}{1 - 1 \left(1 - T_s / 270 \right) 10^{-\frac{\Delta}{10}}} \quad (43)$$

$\langle T_m \rangle$ pour $\Delta = 0 \text{ dB} - 0.5 \text{ dB} - 1.5 \text{ dB}$ converge vers une valeur de 270°K pour $T_s = 300^\circ\text{K}$.

Dans l'expérience OTS, il a été constaté que des erreurs ont accompagné le format de la matrice $(T_s * T_m)$, limitant à 30 le nombre de cases de quantification. Une étude (17) a été effectuée sur la base des données de la station de FUCINO (ITALIE) visant à comparer les erreurs induites en comparant des matrices de tailles allant de $(200 * 200)$ à $(10 * 10)$. Il ressort de cette analyse que le standard retenu, $(30 * 30)$, donnait les caractéristiques principales de T_m .

Par ailleurs, du fait de la relation logarithmique entre A et T_s , il s'ensuit une quantification non linéaire de T_s , se traduisant par la perte de nombreux détails.

Des quantifications de A allant de 0.1 à 1 dB ont montré que l'on pouvait se limiter à un pas de 0.5 dB tout en préservant les caractéristiques de T_m . Par conséquent, on a retenu une taille de case de 0.5 dB (17).

Pour des statistiques à long terme, on peut réécrire le modèle de conversion initial sous la forme suivante:

$$A = 10 \log \left(\frac{T_m - T_c}{T_m - T_s} \right) + \Delta \quad (44)$$

Avec : $260 < T_m < 270^\circ\text{K}$
 Pour $150 < T_s < 270^\circ\text{K}$
 $0 < \Delta < 0.5 \text{ dB}$

Un radiomètre étalonné suivant ces modalités donne une précision supérieure à 0.5 dB.

D'autres études statistiques ont abouti à une droite d'étalonnage sous forme d'une relation linéaire entre T_m et T_s (65). En effet, on peut écrire:

$$T_s = T_c / A + (1 - 1/A) T_m \quad (45)$$

qui est une relation linéaire en $1/A$.

La comparaison du modèle T_m constante et la loi linéaire fait apparaître une sous-estimation de A par le premier.

Des hypothèses ont été émises selon lesquelles l'affaiblissement mesuré est dû en partie à des effets pour lesquels le radiomètre est peu sensible (scintillation, diffusion).

Signalons que des sous-estimations de 5% sur T_m ont pu être relevées. Par conséquent, cette contribution doit être retranchée avant comparaison avec les prévisions radiométriques (67). Signalons enfin qu'un autre modèle linéaire a été proposé (67) sur la base de la température T_g mesurée au sol :

$$T_m = 1.12 T_g - 50 \quad (46)$$

Par ailleurs, la représentation de T_s en $1/A$ conduit à une droite de régression. Cette courbe $T_s = T_c/A + (1 - 1/A) T_m$ revêt un caractère important dans la mesure où l'ordonnée à l'origine n'est autre que T_m et l'intersection avec l'axe $1/A$ représente le 0 dB de référence.

On observe aussi un étalement des points autour du point présumé 0 dB de référence. La précision du 0 dB sera estimée à partir de ces points. Ce décalage du zéro pourrait aussi avoir comme explication le décalage de fréquence et/ou de polarisation entre radiomètre et balise (66). Les lois de similitude en fréquence du CCIR permettent de corriger ce décalage.

4 - Etalonnage en ciel-clair

Pour des angles d'élévation compris entre 20 et 30 degrés et pour une température du milieu $T_m = 270^\circ\text{K}$, on a un niveau de température de ciel T_s compris entre 15 et 20 °K, soit un affaiblissement de l'ordre de 0.3 dB.

Ce niveau "ciel-clair", mesuré par le radiomètre, est exempt des variations diurnes car la quantité d'oxygène et de vapeur d'eau est quasi - constante.

5 - Etalonnage en présence de précipitations

Dans de telles conditions, la région de l'atmosphère se trouvant dans le champ de vision du radiomètre peut être de structure et de composition fortement dépendante du site où est installé le radiomètre. Cette région de l'atmosphère peut être composée de cellules de pluie de diamètre allant de 1 à 3 km. La valeur de T_m est comprise entre 250 et 270°K si on ne tient pas compte de l'influence des lobes secondaires.

La prise en compte des lobes secondaires a pour effet la modification des caractéristiques (T_m , T_s) (58). La combinaison de leur effet et celui de la cellule de pluie (effet de diffusion) conduit à un T_m de l'ordre de 270°K.

Si la pluie est stratiforme ou composée d'une large cellule couvrant tout le site, T_m aura tendance à se rapprocher de la température de l'atmosphère à l'équilibre thermodynamique soit 290°K (58).

L'existence de deux types de pluie conduit à utiliser des modèles d'inversion appropriés à chaque type de radiomètre (68), (72).

Pour chaque taux R, la section efficace d'absorption change selon que la taille prépondérante des gouttes de la distribution de pluie est plus ou moins proche de la longueur d'onde la plus absorbée.

Les phénomènes de propagation peuvent se compliquer par la présence d'autres particules (neige fondante, grêle ...) se trouvant dans la "bande brillante", elle même variable et qui contribue fortement à l'affaiblissement (69) (72). En effet, l'affaiblissement total de la neige fondante est supérieur à celui dû à la pluie.

C'est pourquoi l'utilisation d'un radar pour déterminer la réflectivité de cette couche est utile (73).

En période de pluie la méthode mentionnée précédemment n'est plus valable.

III - LA DEPOLARISATION DES ONDES

Afin d'augmenter la capacité des bandes de fréquences allouées aux divers services, on a imaginé d'utiliser les mêmes bandes de fréquences sur deux polarisations orthogonales. Cette technique a été abondamment étudiée et elle est maintenant mise en oeuvre dans les systèmes travaillant à des fréquences inférieures à 10 GHz. Aux fréquences supérieures à 10 GHz, les performances des systèmes travaillant en réutilisation de fréquence sur deux polarisations orthogonales peuvent être fortement dégradées au cours de la propagation des ondes dans l'atmosphère par un transfert d'énergie d'une polarisation dans l'autre, ce qui se traduit par des interférences. Ce phénomène est connu sous le nom de **transpolarisation** mais plus fréquemment (quoiqu'improprement) sous le nom de **dépolarisation**.

Il a été étudié dans tous les programmes de propagation à partir d'un satellite et les données recueillies lors de ces diverses campagnes de mesures ont permis un approfondissement de ses mécanismes qui ont conduit à l'élaboration de modèles de prévision. Il est dû à la présence dans l'atmosphère d'hydrométéores non sphériques (gouttes de pluie ou cristaux de glace).

Les performances des systèmes à réutilisation de fréquence sur deux polarisations orthogonales sont caractérisées par les **découplages de polarisation (XPD)** ou mieux par les **rapports d'isolation (XPI)** qui, pour des polarisations linéaires, sont respectivement définis par :

$$\text{XPD}_{hh} \text{ (dB)} = 20 \log(E_{hh} / \Delta E_v) \quad (47)$$

$$\text{XPD}_{vv} \text{ (dB)} = 20 \log(E_{vv} / \Delta E_h)$$

$$\text{XPI}_{hh} \text{ (dB)} = 20 \log(E_{hh} / \Delta E_h) \quad (48)$$

$$\text{XPI}_{vv} \text{ (dB)} = 20 \log(E_{vv} / \Delta E_v)$$

où E_{hh} et E_{vv} représentent les champs électriques copolaires (reçus dans la même direction que les champs émis), et ΔE_h et ΔE_v sont les champs contrapolaires (reçus dans la direction orthogonale aux champs émis). (Ces divers champs sont représentés sur la **figure 9**). Les quantités qui intéressent les ingénieurs système sont les rapports d'isolation XPI qui déterminent l'isolation des canaux mais, dans la plupart des expériences de propagation (à l'exception des Comstar), on n'émét que sur une polarisation et on mesure le découplage de polarisation.

En fait, on peut montrer (75) que les deux types de rapport sont pratiquement égaux. C'est aussi ce que confirme l'expérience (11).

1 - LA DEPOLARISATION DUE A LA PLUIE

1 - 1 Résumé de la théorie

La dépolarisation induite par la pluie est due à l'affaiblissement différentiel et au déphasage créés par la non-sphéricité des gouttes de pluie. A mesure que les dimensions des gouttes de pluie augmentent, leur forme change et passe de celle d'une sphère à celle d'un ellipsoïde plus ou moins aplati. Qui plus est, les gouttes peuvent présenter une certaine inclinaison par rapport à l'horizontale à cause des gradients de vent.

Classiquement, on représente une goutte de pluie par un ellipsoïde allongé dont le grand axe fait un angle F avec l'horizontale (figure 10) et dont les axes ont des longueurs liées au rayon de la sphère de même volume (76),(77). A partir de ce modèle, on montre (78) que

$$\begin{aligned} XPD_v &= 20 \log (1 + T_{II} \operatorname{tg}^2 \Phi / T_I) / ((T_{II}/ T_I) - 1) \operatorname{tg} \Phi \\ XPD_h &= 20 \log ((T_{II}/ T_I) + \operatorname{tg}^2 \Phi) / ((T_{II}/ T_I) - 1) \operatorname{tg} \Phi \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{où} \quad T_I &= e^{-(A_I - j \Phi_I) L} \\ T_{II} &= e^{-(A_{II} - j \Phi_{II}) L} \end{aligned} \quad (50)$$

A_I et A_{II} d'une part, et Φ_I et Φ_{II} d'autre part, étant respectivement les affaiblissements et les déphasages spécifiques suivant les directions I et II du petit et du grand axe de l'ellipse, L étant la longueur du volume de pluie dans la direction de propagation.

Dans le cas d'ondes polarisées circulairement on a

$$XPD_C = 20 \log ((T_{II} + T_I) e^{2j\Phi} / (T_{II} - T_I)) \quad (51)$$

où $e^{2j\Phi}$ est la moyenne de $e^{2j\Phi}$ prise sur les angles d'inclinaison. Les mesures effectuées sur les trajets satellite-Terre tendent à montrer que pour la plupart des gouttes non sphériques, l'angle d'inclinaison est très voisin de 0° (horizontale).

La détermination des découplages de polarisation exige le calcul des coefficients de transmission T_I et T_{II} .

Ce calcul a été fait par de nombreux chercheurs et notamment par Oguchi (76). On constate par le calcul et l'expérience que le découplage de polarisation est plus grand (meilleur) pour des ondes polarisées verticalement que pour des ondes polarisées horizontalement. Des ondes polarisées circulairement ont des découplages de polarisation inférieurs (plus mauvais) d'environ 10 dB que les ondes polarisées horizontalement.

1 - 2 Mesures de la dépolarisation

Depuis le lancement d'ATS-6 de nombreuses mesures de dépolarisation ont été effectuées, les plus complètes étant celles effectuées à l'aide des satellites COMSTAR.

Les résultats obtenus à 20 et 30 GHz sont résumés dans le **Tableau IX** tiré de (78).

On voit que pour des angles d'élévation supérieurs à 20° le découplage de polarisation pendant 0,01 % du temps se situe entre 12 et 18 dB. (Alors qu'il est supérieur à 20 dB dans les bandes 4-6 et 12-18 GHz). Pour la plupart des systèmes, un découplage de polarisation d'au moins 20 dB est nécessaire pour atteindre des performances acceptables, une valeur de 25 à 30 dB étant souhaitable pour des liaisons de très bonne qualité.

1 - 3 Prévision des découplages de polarisation

D'un point de vue statistique, on peut relier les modules du découplage de polarisation aux affaiblissements copolaires par la relation empirique :

$$\mathbf{XPD = U - V \log A} \quad (52)$$

où A est l'affaiblissement copolaire, U et V des constantes déterminées expérimentalement et qui dépendent de la fréquence, de la polarisation, de l'élévation, de l'angle d'inclinaison des gouttes, etc...

A partir du modèle d'Oguchi (76), Nowland et al. (79) ont proposé pour des ellipsoïdes allongés les relations suivantes :

$$\mathbf{U = 20 \log((e^{-2\sigma_\phi \Delta k \cos 2\theta} \cdot \sin(2\phi - \delta))/2)} \quad (53)$$

$$\text{avec} \quad \mathbf{\Delta k = (A_{||} - A_{\perp})^2 + (\Phi_{||} - \Phi_{\perp})^2} \quad (54)$$

$$\text{et} \quad \mathbf{V = 23} \quad \text{pour } \mathbf{15 < f < 35 \text{ GHz}}$$

θ étant l'angle d'élévation, σ_ϕ l'écart type de la distribution des angles d'inclinaison ϕ et δ l'angle que fait la polarisation avec le plan horizontal. Dans le cas de la polarisation circulaire, $\phi - \delta = 45^\circ$.

Plus simplement, le C.C.I.R. recommande de prendre pour U la relation suivante :

$$\mathbf{U = 30 \log f - 40 \log(\cos\theta) - 20 \log(\sin 2\phi - \delta)} \quad (55)$$

où f est la fréquence en GHz, θ° l'angle d'élévation, ϕ° l'angle d'inclinaison des gouttes et δ° l'angle de polarisation. La constante V est prise égale à 23 pour les fréquences comprises entre 15 et 35 GHz.

Ces diverses relations ont été testées avec les données recueillies lors de l'action COST 205. On constate que les valeurs de U et V varient considérablement en fonction de l'emplacement de la station de réception.

Fukuchi et al. (46) ont récemment proposé des relations permettant de prévoir le découplage de polarisation à diverses fréquences lorsqu'on connaît le découplage à une autre fréquence.

2 - LA DEPOLARISATION DUE A LA GLACE

Les mesures effectuées avec ATS-6 ont fait apparaître un phénomène nouveau, la dépolarisation sans affaiblissement de la composante copolaire qu'on a d'abord qualifié de "dépolarisation anormale". Il s'agit en fait de la dépolarisation provoquée par les cristaux de glace atmosphériques (4) dont la constante diélectrique présente une partie imaginaire très petite. On a aussi observé des variations brutales du niveau de la composante contrapolaire qui sont liées aux variations d'orientation des cristaux de glace lors des décharges orageuses (80).

La dépolarisation par la glace provoque un déphasage différentiel pratiquement sans affaiblissement, ce qui explique les phénomènes observés.

La fréquence d'occurrence et la sévérité de la dépolarisation par la glace dépend de la géographie et de la climatologie mais les résultats obtenus à 19 et 28 GHz par Cox et al. (11) montrent que les dépolarisations dues à des phases mixtes glace-pluie sont environ dix fois plus nombreuses que celles dues à la glace seule. D'autres mesures effectuées au Texas et au Canada confirment ces résultats. Par contre les observations faites en Virginie montrent que les dépolarisations sont le plus souvent dues à la pluie seule.

Pour fixer les idées, on donne sur la **figure 11** les distributions cumulatives des découplages de polarisation dus à la glace seule et à la phase mixte.

La modélisation de la propagation à travers un milieu contenant des particules de glace implique la connaissance des formes, des dimensions et du nombre de particules présentes dans le milieu (81). On est bien loin de posséder toutes ces informations. Cependant des modèles simplifiés permettent de rendre compte en partie des phénomènes observés : Yeh et al. (82) ont calculé la diffusion par des aiguilles et des plaques de glace à 30 GHz et ont montré que les particules de glace non sphériques provoquaient des dépolarisations beaucoup plus importantes que la pluie, que les plaques de glace induisent des dépolarisations plus intenses que les aiguilles de glace et qu'il fallait prendre en compte la diffusion multiple. C'est ce que confirment aussi les calculs de Tsolakis et Stutzman (83) qui ont montré que, dans les cas extrêmes (faible angle d'élévation,

forte densité de cristaux de glace, fréquence élevée), la théorie de la diffusion simple sous-estime le découplage de polarisation. Chu (84) a montré théoriquement que les dépolarisations dues à la pluie ou aux cristaux de glace varient toutes deux linéairement en fonction de la fréquence, au moins entre 10 et 30 GHz. On peut donc calculer le découplage de polarisation à une fréquence f_1 en fonction du découplage à la fréquence f_2 à l'aide de la relation :

$$\mathbf{XPD}_2 = \mathbf{XPD}_1 + 20 \log(f_2/f_1) \quad (56)$$

Cette relation est bien vérifiée par les résultats expérimentaux (11).

Pour des angles d'élévation supérieurs à 10° , le rapport des amplitudes des dépolarisations dues à la pluie ou à la glace pour des angles θ_1 et θ_2 est donné par (11) :

$$\mathbf{XPD}_2 = \mathbf{XPD}_1 + 20 \log (\cos^2\theta_2.\sin\theta_1/\cos^2\theta_1.\sin\theta_2) \quad (57)$$

IV- LES SCINTILLATIONS TROPOSPHERIQUES

1.INTRODUCTION

L'atmosphère en général et la troposphère en particulier ne sont pas un milieu homogène mais leurs variables d'état sont affectées d'irrégularités. La température, la pression et plus encore l'humidité sont donc des variables fluctuantes, et partant l'indice de réfraction des ondes électromagnétiques. Le fait de savoir comment ces irrégularités sont descriptibles au moyen de fonctions aléatoires est une difficile question non encore complètement résolue. Si dans certain cas, comme celui de la "turbulence air-clair", la théorie de Kolmogorov semble adéquate (cf infra) il n'est pas évident qu'il en soit de même lorsqu'on veut rendre compte de la structure des nuages ou de la pluie. On verra par la suite combien cette question peut être importante et qu'elle doit, en conséquence, recevoir la plus grande attention.

Quoiqu'il en soit, les ondes électromagnétiques sont affectées par la présence de ces irrégularités le long du trajet radioélectrique, on doit donc s'attendre à observer de rapides fluctuations d'amplitude, d'angle d'arrivée et de phase. Ces phénomènes, appelés quelquefois évanouissements dus aux trajets multiples atmosphériques mais plus communément scintillations, sont d'importance variable selon les conditions météorologiques prévalantes. Aux alentours de 1-2 GHz les irrégularités ionosphériques sont prédominantes alors qu'aux fréquences plus élevées correspondant aux longueurs d'ondes centimétriques et millimétriques seules subsistent les scintillations troposphériques.

En dehors de l'intérêt propre de l'étude des scintillations pouvant conduire à une meilleure connaissance de l'atmosphère, on est en droit de se demander si cette étude est vraiment indispensable à la conception des systèmes de télécommunications par satellite fonctionnant en micro-ondes. En effet, les écarts d'amplitude observés atteignent rarement des valeurs supérieures à quelques dB. Pour les systèmes travaillant à 20-30 GHz avec une marge suffisante de telles valeurs sont négligeables par rapport aux atténuations provoquées par la pluie. On pourrait donc a priori estimer qu'il s'agit là d'un problème secondaire. Une analyse détaillée montre cependant qu'il faut se garder d'un jugement aussi hatif. Trop d'inconnues subsistent tant expérimentalement que théoriquement pour que l'on soit sûr qu'il n'y ait rien à craindre. Par exemple, peu de données existent sur les effets de sélectivité des scintillations, effets que supportent mal les modulations numériques à haut débit. On peut également mentionner que le bruit de phase induit par les scintillations peut perturber le fonctionnement des systèmes de poursuite à pas n'utilisant qu'une faible bande passante.

Les expériences consacrées à l'étude des scintillations ne sont pas très nombreuses même si elles ont donné lieu à un grand nombre de publications. On notera au passage que les données ont été recueillies avec le souci de limiter le volume des enregistrements ce qui ne facilite pas toujours une étude exhaustive du phénomène. On trouvera dans le tableau X un résumé des principales caractéristiques des expériences déjà réalisées et qui nous ont servi (on ne mentionne que le segment spatial de ces expériences). La faible influence, a priori, de la fréquence sur le phénomène des scintillations justifie qu'on s'intéresse à toutes les données.

On doit déjà noter que les expériences réalisées n'ont pas été de durée suffisante pour qu'on puisse prétendre avoir une vue complète du phénomène de scintillations. Certains cas ont été bien couverts (nuages cumuliformes) alors que d'autres ne l'ont pratiquement pas été (pluie), ce qui explique quelques contradictions expérimentales.

Dans un premier temps, on rappellera brièvement les principales observations expérimentales en examinant tour à tour les différents aspects liés à la mesure du canal de propagation ainsi qu'à l'influence des équipements de réception. On donnera ensuite quelques éléments théoriques permettant de comprendre certains des traits caractéristiques du phénomène. Enfin on conclura cet exposé en soulignant l'intérêt qu'il y a à poursuivre les observations pour compléter notre connaissance des faits et les progrès théoriques qu'il faudrait réaliser conjointement pour combler les lacunes que l'expérience OLYMPUS ne nous permettra pas d'aborder.

2. STATISTIQUES D'AMPLITUDE

Les scintillations se présentent sous des aspects différents selon les conditions météorologiques qui en sont la cause. Une typologie peut se dégager en regardant l'évolution temporelle de l'amplitude. Les figures 12a et 12b montrent deux exemples de phénomènes enregistrés à Crawford Hill en utilisant le satellite COMSTAR [86].

La première figure, caractéristique d'un événement de scintillations sèches, permet de voir que l'amplitude des signaux recueillis varie symétriquement de plusieurs décibels à une cadence de l'ordre de 0,3 Hz. Ce type d'événement n'est accompagné d'aucune atténuation moyenne, leur début et leur fin coïncident avec le passage de nuages cumuliformes au travers de la liaison. À l'inverse tous les nuages ne produisent pas de scintillations, seuls les nuages denses contenant une grande quantité d'eau et de vapeur d'eau en sont responsables. Les variations temporelles du signal observé au sol sont alors attribuables au déplacement du nuage à travers le lobe d'antenne. Le vent est en quelque sorte responsable de la transformation de la structure spatiale des hétérogénéités nuageuses en structure temporelle de variations du signal reçu. Cette hypothèse valable sur un laps de temps court (quelques minutes) est appelée hypothèse de "turbulence gelée" et joue sans aucun doute un rôle déterminant dans l'analyse des phénomènes de scintillations.

À l'inverse la figure 12b illustre un événement où les fluctuations d'amplitude se superposent à une atténuation moyenne. De tels événements sont dits humides. La présence d'une pluie concomitante est cependant contestée [86][90]. Il semble toutefois que lors des atténuations fortes les scintillations soient faibles. Encore faudrait-il s'entendre sur les termes car en présence de pluie on observe parfois des variations rapides de l'amplitude qui sont alors dissymétriques et traduisent vraisemblablement des variations de l'atténuation proprement dite. [89]. Dans ce cas ce sont les irrégularités de la structure des précipitations qui sont la cause des fluctuations du niveau enregistré. Ce type de phénomène a été en fait très peu étudié, la plupart des auteurs s'étant concentrés sur les événements secs. Certains auteurs [86] ont cependant tenté de séparer ce qui était dû aux nuages de ce qui était dû à la pluie en tablant sur un comportement différentiel en fréquence de ces deux types d'événements.

L'amplitude du signal reçu apparaît de prime abord comme un signal aléatoire. On a donc cherché en premier lieu à déterminer ses propriétés statistiques. Un paramètre issu des études ionosphériques permet de caractériser l'intensité des fluctuations; l'indice de fluctuation S_i est défini par:

$$S_i = \frac{P_{\max} - P_{\min}}{P_{\max} - P_{\min}} 100 (\%) \quad (58)$$

P_{\max} et P_{\min} sont déterminés de la façon suivante: durant un intervalle de temps assez long (30mn pour la référence {91}) on note la valeur maximum et minimum de la puissance reçue. P_{\max} est alors le troisième pic de puissance par ordre décroissant en partant du maximum et P_{\min} le troisième pic par ordre croissant en partant du minimum. On a montré que sous certaines conditions (normalité du logarithme de l'amplitude) S_i est lié linéairement à l'écart type de l'amplitude. L'avantage d'un tel indice reste qu'il caractérise les fluctuations indépendamment de leur nature.

La théorie de turbulence faible (voir plus loin) prévoit cependant qu'à "court terme" le logarithme de l'amplitude est un signal gaussien stationnaire de variance σ_χ^2 {92}{93}. Ceci a été observé sur les scintillations sèches (air clair et nuageux) par tous les expérimentateurs {91}{92}{93}. La période sur laquelle une telle stationnarité est observée peut atteindre 10 mn. L'écart type de la gaussienne σ_χ suit une loi log-normale, elle-même de variance σ_0^2 . Le mélange des deux distributions est en remarquable accord avec les résultats expérimentaux. (figure 13). Une telle description caractérise donc complètement la statistique du premier ordre de l'amplitude.

3.OCCURRENCE

Trois études {90}{91}{94} sont suffisamment complètes pour fournir une estimation de l'occurrence des scintillations sèches. La plus complète semble être celle utilisant le satellite italien SIRIO. En tout état de cause les résultats sont concordants. On notera que ces trois expériences proviennent de l'Europe de l'Ouest. Si l'on utilise l'indice S_i défini plus haut, on observe d'abord une variation diurne importante qui se traduit par une augmentation de l'activité au début de l'après midi ainsi que le montre la figure 14. On note également un renforcement moindre de cette activité au lever du soleil. Cet effet diurne se manifeste durant tous les mois d'été. Non seulement les scintillations sont plus fréquentes durant cette période mais leur intensité y est plus forte comme en témoigne la figure 15 où l'on voit que la probabilité d'avoir une variance donnée de l'amplitude est plus grande en été qu'en hiver. L'occurrence en climat tropical est évidemment différente{95}.

4.SPECTRE DES SCINTILLATIONS

4-1 Amplitude

Compte tenu de la difficulté déjà mentionnée de conserver une grande quantité de données on ne dispose en fait que de quelques exemples qui malgré certaines différences ont un certain nombre de points communs{90}.

La figure 16 fournit deux exemples de spectre. L'un (courbe 1) est relatif à un événement de scintillations sèches, l'autre (courbe 2) provient d'un événement humide.

La courbe 1 présente trois parties distinctes:

- une partie plate s'étendant jusqu'à une fréquence f_t .

-une partie allant de f_t à f_n et présentant une décroissance exponentielle avec la fréquence de pente $-8/3$.

-la dernière partie, au delà de f_n est représentative du bruit du récepteur.

Une observation plus fine {86} permet d'observer une deuxième cassure dans le spectre donnant une pente en f^{-6} Quoiqu'il en soit, l'ensemble des observations semblent indiquer qu'1 Hz est la limite supérieure du spectre des scintillations.

La valeur $-8/3$ pour le début de la décroissance du spectre n'est pas toujours observée et de fait il apparaît que cette pente est d'autant plus forte que les scintillations sont intenses (de $-2,55$ à $-3,045$) {89}.

La courbe 2 montre qu'en présence d'une absorption moyenne le spectre est modifié dans sa partie basse fréquence. On a pu observer par exemple une remontée significative vers 0,03Hz. Certains{91} attribuent ces modifications à des effets de filtrage dûs aux dimensions finies des zones turbulentes ainsi qu'à la présence d'ondes atmosphériques.

4-2. Phase

Si les spectres expérimentaux d'amplitude sont peu fréquents, les spectres de phase sont inexistant. La mesure des fluctuations de phase est délicate car elle suppose une bonne stabilité des oscillateurs locaux. On doit prendre garde à ce qu'en période d'atténuation moyenne importante (événement humide) la dégradation du rapport signal à bruit n'induisse de fausses scintillations de phase. {11}.

En ce qui concerne les scintillations sèches on n'a pas pu jusqu'à présent mettre en évidence des fluctuations de phase associées à la turbulence atmosphérique{89}. Des considérations théoriques ont même montré qu'elles devaient être de trois ordres de grandeur en dessous des fluctuations de phase des oscillateurs pour des fréquences inférieures à 1 Hz (dans la technologie actuelle). En revanche la situation pourrait être modifiée en cas de pluie et des variations de phase à des fréquences de l'ordre de la dizaine de Hertz seraient suffisamment fortes pour être observables.

5-PARAMETRES DE LA LIAISON INFLUENCANT LES SCINTILLATIONS

Après avoir passé en revue les caractéristiques principales des scintillations, examinons leurs variations avec quelques paramètres radioélectriques: polarisation, angle d'élévation, ouverture de lobe d'antenne et fréquence.

5-1.Polarisation{86}{90}

Les résultats sont tous concordants et relativement peu surprenants. Aucune dépolarisation n'est observée durant les phénomènes de scintillations et la corrélation entre les amplitudes mesurées sur deux polarisations linéaires est presque parfaite, aussi bien en moyenne qu'instantanément.

5-2 Angle d'ouverture

Comme on peut s'y attendre il n'y a pas de corrélation instantanée entre les scintillations observées sur deux antennes séparées. La **figure 17** extraite de {86} en est la preuve. Bien entendu cela n'exclut pas qu'il y ait une corrélation totale entre les occurrences. La **figure 17** montre cependant que les fluctuations sont plus intenses sur les systèmes à faible ouverture que sur les systèmes à forte ouverture. La variance du logarithme de l'amplitude varie avec le rayon efficace R de l'antenne selon la formule {98}.

$$\sigma_{\chi^2} = \text{Cte } G(R) \quad (59)$$

$$G(R) = \begin{cases} 1-1,4R/\sqrt{\lambda L} & \text{pour } 0 \leq R/\sqrt{\lambda L} \leq 0,5 \\ 1,5-0,4R/\sqrt{\lambda L} & \text{pour } 0,5 < R/\sqrt{\lambda L} \leq 1 \\ 0,1 & \text{pour } R/\sqrt{\lambda L} > 1 \end{cases} \quad (60)$$

L est la distance du récepteur à la couche turbulente et λ la longueur d'onde de travail. Un bon accord expérimental {86} a pu être observé dans la région $0 \leq R/\sqrt{\lambda L} \leq 0,5$. On notera à ce sujet de légères différences d'appréciation de la signification de L, prise par certains auteurs {90}{89} comme la longueur du chemin parcouru dans la couche turbulente.

5-3 Angle d'élévation

La diminution de l'angle d'élévation s'accompagne de l'augmentation du parcours des ondes dans la troposphère. On s'attend donc à ce que l'intensité des scintillations croisse en raison inverse de l'élévation. C'est bien ce qui est observé {87}. Des évanouissements de 20 dB ou supérieurs durant quelques secondes, ont été observés pour un angle d'élévation inférieur à 10° , ce qui suggère la présence d'un mécanisme de trajets multiples. La figure 18 montre un exemple de variation de l'intensité des fluctuations avec l'angle d'élévation. A 2 comme à 30 GHz cette variation s'accorde {8} avec une loi du type $\sigma_{\chi^2} = A / \sin^B \theta$. Pour les deux fréquences citées on trouve $B_2 = 1,6 \pm 0,2$ et $B_{30} = 2,14 \pm 0,3$.

5-4 Fréquence

Ainsi que la figure 1 le montre clairement sur un événement type, les fluctuations d'amplitude à 19 et 28 GHz sont instantanément corrélées. La figure 19 confirme cette analyse sur une base statistique plus large. On trouve même que le rapport des amplitudes en decibels est de 1,2. Comme pour la polarisation, cette corrélation se retrouve en moyenne.

L'apparence d'une excellente corrélation instantanée, jointe au fait que l'indice de réfraction est largement indépendant de la fréquence peut conduire à penser que les scintillations sont un phénomène ne présentant pas de sélectivité. On ne dispose en fait que de très peu de mesure simultanée sur plusieurs fréquences. Avec le satellite ATS6 on a mesuré l'amplitude et la phase relative de neuf sous-porteuses réparties sur 1,44 GHz et l'on a pas plus que dans l'expérience COMSTAR mis en évidence d'effet de sélectivité. {8}{86}.

Ce constat mérite cependant deux commentaires. Le premier consiste à remarquer que ni dans ATS6 (où les mesures ont été sporadiques), ni dans COMSTAR (où seuls les événements secs ont été vraiment analysés) l'étude n'a été suffisamment exhaustive pour clore le sujet. Le second est que toutes ces mesures ont été faites avec un temps d'intégration assez long, excluant de ce fait l'observation de phénomènes sélectifs rapides ($\approx 100\text{Hz}$) {87}.

Certaines observations faites avec SIRIO indiquent l'absence de cohérence en bande large (≈ 1 GHz) lors de certains événements. Récemment un modèle théorique fondé sur une structure particulière de la couche nuageuse {90}, en rendant compte des observations faites sur l'amplitude, montre qu'occasionnellement des distorsions de temps de groupe peuvent être visibles sur des largeurs de bande supérieures à 1 GHz. Presque rien n'a été fait en ce qui concerne les événements humides. En conclusion le plus sage est de dire que la sélectivité reste un problème ouvert même si l'on a de bonnes raisons de penser qu'il n'est pas crucial dans la technologie actuellement envisagée.

6-ELEMENTS THEORIQUES

Il ne s'agit pas ici de retracer les théories émises pour expliquer les observations rapportées ci-dessus, mais de donner les grandes lignes de leur démarche ainsi que leurs points d'accord. On concluera sur les progrès qui sont souhaitables et les stratégies à mettre en œuvre pour y parvenir.

6-1 La turbulence faible

Il s'agit de la théorie la plus ancienne {99}{100}. Elle est fondée sur un certain nombre d'approximations qu'il faut garder à l'esprit lorsqu'on désire l'appliquer. L'indice de réfraction des micro-ondes varie peu autour de la valeur 1. L'équation des ondes s'écrit donc, en privilégiant par exemple le champ électrique E :

$$[\nabla^2 + k_0^2(1+n_1)^2] E(\mathbf{r}) = 0 \quad k_0 = \omega/c \quad (61)$$

avec $n_1 \ll 1$ (l'indice se compte en millionnièmes....)

On peut alors écrire $(1+n_1)^2 - 1 = \delta n \approx 2n_1$

Par ailleurs on applique l'approximation de Rytov qui consiste à développer l'équation d'Helmholtz au premier ordre en ayant posé $E(\mathbf{r}) = E_0(\mathbf{r}) \exp(\psi_1(\mathbf{r}))$. E_0 est la solution en absence de perturbations ($n_1 = 0$).

On montre alors que $\psi(\mathbf{r})$ est solution d'une équation intégrale. Au premier ordre on obtient:

$$\psi_1(\mathbf{r}) = \frac{2k_0^2}{E_0(\mathbf{r})} \int_V G(\mathbf{r}-\mathbf{r}') E_0(\mathbf{r}') n_1(\mathbf{r}') d\mathbf{r}' \quad (62)$$

L'intégrale étant étendue à tout le domaine où $n_1(\mathbf{r}) \neq 0$ et $G(\mathbf{r})$ est le propagateur en espace libre:

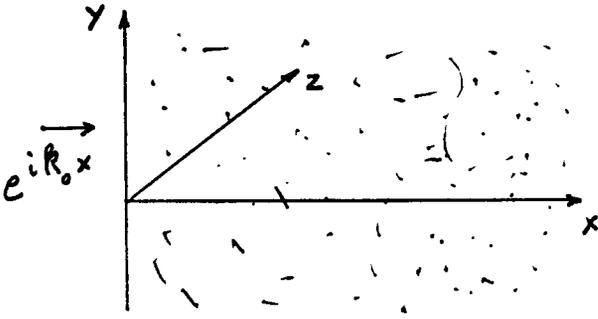
$$G(\mathbf{r}) = \frac{\exp(i k_0 |\mathbf{r}-\mathbf{r}'|)}{4\pi |\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} \quad (63)$$

L'avantage de l'approximation de Rytov est qu'elle fournit immédiatement les fluctuations du logarithme de l'amplitude et celles de la phase puisqu'avec des notations évidentes on a:

$$\psi(\mathbf{r}) = \text{Log} \left(\frac{A}{A_0} \right) + i(\Phi - \Phi_0) = \chi + i\Phi \quad (64)$$

On notera que $\langle \chi \rangle = 0$ puisque $\langle n_1 \rangle = 0$, ce qui implique $\langle \text{Log} A \rangle = \text{Log} A_0$ et donc que $\chi = \text{Log} A - \langle \text{Log} A \rangle$ représente bien les fluctuations du logarithme de l'amplitude des ondes.

Le premier résultat que l'on peut obtenir concerne la variance σ_χ^2 du logarithme de l'amplitude. Pour ce faire on se spécialise au cas d'une onde plane $E_0(\mathbf{r}) = \exp(ik_0x)$ tombant sur un demi-espace turbulent homogène et isotrope et l'on s'intéresse à la valeur de ψ_1 au point d'observation $P(L,y,z)$.



On fera les hypothèses raisonnables suivantes:
1) la diffusion arrière est négligeable, ce qui limite le domaine d'intégration à $(0, L)$

2) la diffusion avant est concentrée dans un petit angle, ce qui légitime les inégalités $|y - y'|, |z - z'| \ll |x - x'|$. Dans ces conditions le propagateur libre se simplifie considérablement.

De façon similaire on peut écrire la fonction de covariance du logarithme de l'amplitude $B_\chi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)$ sous la forme d'une double intégrale de convolution:

$$B_\chi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \iint h(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}'_1) h^*(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}'_2) \langle n_1(\mathbf{r}'_1) n_1^*(\mathbf{r}'_2) \rangle d\mathbf{r}'_1 d\mathbf{r}'_2 \quad (65)$$

où apparaît la fonction de covariance de l'indice de réfraction $B_\chi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \langle n_1(\mathbf{r}_1) n_1^*(\mathbf{r}_2) \rangle$

La géométrie du problème indique qu'il est approprié de chercher la valeur de B_χ dans le plan $x=L$. Introduisons la densité spectrale $F(\mathbf{K})$ du processus $n_1(\mathbf{r})$. Si \mathbf{K}_\perp et K_\parallel sont les composantes transverses et parallèle du vecteur d'onde \mathbf{K} et $\mathbf{r}'_1 - \mathbf{r}'_2 = (\delta, \rho)$ on aura d'après le théorème de Wiener-Khintchine:

$$B_n(\delta, \rho) = \int F(\mathbf{K}_\perp, K_\parallel) e^{i\mathbf{K}_\perp \cdot \rho} e^{iK_\parallel \delta} d\mathbf{K}_\perp dK_\parallel \quad (66)$$

Alors le calcul de certaines intégrales s'opère relativement aisément moyennant l'hypothèse raisonnable que la longueur de corrélation est beaucoup plus faible que L .

Lorsque l'indice de réfraction est réel (air clair par exemple) on obtient:

$$B_\chi(L, \rho) = 2\pi^2 k_0^2 \int_0^\infty K_\perp J_0(K_\perp \rho) f(K_\perp) F(0, K_\perp) dK_\perp \quad (67)$$

où $f(K_\perp)$ est une fonction de filtrage égale à $1 - k_0 \sin(K_\perp^2 L / k_0) / K_\perp^2 L$ qui sélectionne les composantes spectrales des fluctuations géométriquement susceptibles de produire des scintillations (n_1 étant réel, les variations d'amplitude sont dues à un processus d'interférence). La variance σ_χ^2 est alors égale à $B_\chi(L, 0)$, soit

$$\sigma_\chi^2 = 2\pi^2 k_0^2 L \int_0^\infty K_\perp F(0, K_\perp) f(K_\perp) dK_\perp \quad (68)$$

Le spectre $F(0, K_\perp)$ n'a pas de valeur notable pour $K_\perp > 2\pi/l$ où l est la longueur de corrélation de l'indice. Pour avoir une valeur précise de σ_χ^2 il faut connaître le spectre $F(0, K_\perp)$. Notons que σ_χ^2 a été obtenu à partir de la fonction de covariance spatiale.

En réalité le récepteur voit le champ fluctuer dans le temps parce que l'atmosphère est animée d'un mouvement. Si la variance temporelle s'identifie alors sans problème avec la variance spatiale calculée plus haut, un point très important reste à élucider: quel est le spectre temporel des scintillations?

Ce problème se résout dans le cadre de l'hypothèse de la turbulence gelée (Taylor) qui consiste à dire que sur de petits intervalles de temps les noyaux de turbulence sont transportés avec le vent

moyen transversal v_t . Dans ces conditions et dans l'hypothèse d'une turbulence homogène la fonction de covariance temporelle $B_n^t(\tau)$ est reliée à la fonction de covariance spatiale $B_n^s(\rho)$ par la relation $B_n^t(\tau) = B_n^s(v_t\tau)$.

On obtient donc avec les mêmes approximations que précédemment la formule suivante:

$$B_\chi^t(L, \tau) = 2\pi^2 k_0^2 L \int_0^\infty K_\perp J_0(K_\perp v_t \tau) f(K_\perp) F(0, K_\perp) dK_\perp \quad (69)$$

Le spectre temporel des scintillations est alors donné par la transformée de Fourier de B_χ^t . En ne considérant que les fréquences positives on obtient

$$W_\chi(L, \omega) = 4 \int_0^\infty B_\chi^t(L, \tau) \cos \omega \tau d\tau \quad (70)$$

ce qui s'écrit

$$W_\chi(L, \omega) = \frac{8\pi^2 k_0^2 L}{v_t} \int_0^\infty f(K_\perp) F(0, K_\perp) dK'_\perp \quad \text{avec } K_\perp = \sqrt{K'^2_\perp + \frac{\omega^2}{v_t^2}} \quad (71)$$

Si l'on connaît $F(0, K_\perp)$ on est donc capable de calculer σ_χ^2 et $W_\chi(\omega)$. L'ensemble des auteurs suit à ce propos la théorie de Kolmogorov. Celle-ci a été établie pour les fluctuations de vitesse et de température. Il est moins évident qu'elle s'applique sans modifications à l'humidité (surtout dans les nuages). L'essentiel de la théorie peut se résumer ainsi. La turbulence est caractérisée par des tourbillons de tailles variables, appelées "échelles de turbulence", comprises entre une échelle extérieure L_0 et une échelle intérieure l_0 . Les tourbillons sont engendrés par les tourbillons d'une taille supérieure selon un phénomène de cascade sans dissipation d'énergie, celle-ci n'ayant lieu qu'à l'échelle intérieure. La source d'énergie responsable de la turbulence est à trouver dans les mouvements moyens à une échelle supérieure à L_0 . Les mouvements moyens sont anisotropes alors que les tourbillons sont isotropes et à accroissements homogènes (la fonction de structure $\langle |f(\mathbf{r}+\mathbf{q})-f(\mathbf{r})|^2 \rangle$ ne dépend que de q).

dans l'atmosphère $l_0 \approx 1 \dots 10 \text{ mm}$ et $L_0 \approx 10 \dots 100 \text{ m}$

Kolmogorov a démontré qu'au moyen de ces hypothèses la fonction de structure de la vitesse et de la température pouvait s'écrire dans le domaine inertiel ($l_0 < q < L_0$)

$$D_v \text{ ou } T(q) = \text{cte } q^{2/3}$$

C'est cette fonction de structure que l'on étend généralement à l'indice de réfraction en posant :

$$D_n(q) = C_n^2 q^{2/3}$$

Bien que dans cette théorie l'indice ne soit pas une fonction homogène, il est possible de définir une densité spectrale qui servira aux calculs de σ_χ^2 et $W_\chi(\omega)$. On obtient alors:

$$F(K_\perp) = 0,033 C_n^2 K_\perp^{-11/3} \exp(-K_\perp^2 / K_m^2) \quad (72) \quad \text{avec } K_m = 5,91/l_0 \quad (73)$$

Des formes différentes du spectre $F(K_\perp)$ ont été données (Von Karman p.e), elles ne changent pas radicalement les résultats.

C_n^2 est la constante de structure de l'indice de réfraction. Ses valeurs typiques, en air clair, sont de l'ordre de 10^{-6} à 10^{-8} .

En réalité, compte tenu de ce qu'on a $L \gg l_0^2/\lambda$, on peut se contenter de l'approximation

$$F(K_\perp) = 0,033 C_n^2 K_\perp^{-11/3} \quad \text{ce qui après intégration donne}$$

$$\sigma_{\chi}^2 = 0,307 C_n^2 k_0^{7/6} L^{11/6} \quad (74)$$

qui est voisine de la formule recommandée par le CCIR où l'exposant 11/6 est remplacé par 1,7. Il est pratiquement sûr qu'il ne s'agit là que d'un détail venant des imprécisions expérimentales.

$W_{\chi}(\omega)$ s'intègre aussi explicitement et donne un spectre pratiquement plat pour $\omega < \omega_t$ et décroissant comme $\omega^{-8/3}$ pour les hautes fréquences. On a les deux valeurs asymptotiques:

$$W_{\chi}(0) = 2,76 \sigma_{\chi}^2 / \omega_t \quad \text{et} \quad W_{\chi}(\infty) = 7,13 (\omega / \omega_t)^{-8/3} \sigma_{\chi}^2 / \omega_t \quad (75)$$

Ces deux valeurs asymptotiques se croisent pour la pulsation $1,43\omega_t$ avec

$$\omega_t = v_t (k_0 / L)^{1/2} \quad (76)$$

ω_t est souvent appelée fréquence de coin.

Pour mémoire, disons que le spectre des fluctuations de phase se déduit de la même théorie (partie imaginaire de χ) et qu'il est représentable par deux asymptotes:

$$W_{\phi}(0) \rightarrow 2W_{\chi}(\infty) \quad \text{et} \quad W_{\phi}(\infty) \rightarrow W_{\chi}(\infty) \quad (77)$$

La variance de la phase est infinie, mais ce sont les tourbillons de taille supérieure à L_0 qui deviennent prépondérant et la théorie tombe alors en défaut. On peut toutefois, en utilisant un spectre de von Karman trouver une expression finie pour cette variance { 100 }:

$$\sigma_{\phi}^2 = 0,782 C_n^2 k_0^2 L L_0^{5/3} - 0,307 C_n^2 k_0^{7/6} L^{11/6} \quad (78)$$

La comparaison avec des données expérimentales a des aspects très positifs: la forme générale du spectre, une décroissance proche de $-8/3$, la dépendance de σ_{χ}^2 avec la fréquence et l'angle d'élévation. Certains points restent cependant discutables: en prenant une constante de structure $C_n^2 = 10^{-6}$ (ce qui est élevé pour de l'air clair) et une longueur de trajet dans la turbulence de 5 km on obtient une variance de 0,1 dB incapable d'expliquer les pics observés de plus de 1 dB. Cela n'est guère étonnant puisqu'en réalité les scintillations sont associées au passage dans le lobe d'antenne de certains nuages. Malheureusement on ne connaît que peu de choses sur la turbulence nuageuse sauf que le taux de dissipation y étant très fort, on doit s'attendre à des coefficients de structure élevés ainsi qu'à une augmentation de l'échelle extérieure L_0 . En outre l'indice de réfraction dépendant fortement de la vapeur d'eau, il serait nécessaire de voir l'influence des échanges radiatifs et des changements de phase sur ce composant. { 102 } { 103 }.

Par ailleurs, la présence d'eau liquide sous forme de gouttelettes dans les nuages introduit une légère atténuation résultant tout à la fois d'absorption et de diffusion. L'indice de réfraction a donc une partie imaginaire et la théorie présentée ci-dessus aurait besoin d'être ajustée pour en tenir compte. { 101 }.

6-2 Modèle déterministe

Si l'on considère qu'en réalité l'entrée d'énergie de la turbulence a lieu à grande échelle et qu'une grande partie du domaine inertiel contribue peu à la variance σ_{χ}^2 , on est tenté de penser que les vrais responsables des scintillations sont des irrégularités diélectriques dont la taille est de l'ordre de grandeur de la première zone de Fresnel. Par ailleurs la théorie de la turbulence épouse un point de vue exclusivement statistique qui ne peut fournir un modèle de fonction de transfert

équivalente de l'atmosphère. Or, ainsi qu'il a déjà été souligné, il est possible que des effets, dits à large bande, deviennent importants pour certains signaux de communication. On a alors besoin d'une description extensive de la turbulence et de construire ce qu'on pourrait appeler un modèle déterministe.

La seule tentative menée à notre connaissance est celle d'une équipe belge {90}. Le modèle proposé consiste à dire que les irrégularités de niveau sont dues au passage de cellules de permittivité différente de celle du milieu ambiant. La géométrie de ces cellules (cylindres ou sphères) ne modifie pas radicalement les résultats. Ce modèle s'apparente à un modèle de trajets multiples. Tout revient en fait à travailler avec une réalisation particulière (au sens probabiliste), c'est à dire avec une valeur des paramètres physiques variant en fonction de la position dans la couche turbulente. On calcule alors la figure de diffraction associée à ce réseau de cellules. Dans ces conditions, la taille de la cellule, comparée à celle de la première zone de Fresnel, joue un rôle déterminant. L'introduction d'une vitesse raisonnable de vent conduit à des fréquences de variation de l'amplitude en conformité avec les observations.

Un tel modèle est évidemment capable de fournir la fonction de transfert du filtre atmosphérique équivalent. La figure 20 est un exemple montrant la distorsion obtenue pour certaines configurations.

7-CONCLUSIONS

Au terme de cette revue on peut faire les observations suivantes:

1. Les scintillations restent à court terme, et vraisemblablement à moyen terme (bandes utilisées nettement inférieures au GHz), un problème secondaire d'un point de vue strictement "télécommunications".

2. Sur le plan expérimental, il est tout à fait souhaitable d'obtenir une banque de données de taille suffisamment importante pour couvrir les points restant obscurs (scintillations humides), ou pas assez documentés (variation de la pente du spectre, de la fréquence de coin...). On notera à ce sujet que l'usage d'une station ayant une antenne de faible diamètre faciliterait ces études. Notons cependant qu'OLYMPUS ne fournira aucune information utilisable directement pour étudier les distorsions sur une large bande. On doit par ailleurs signaler que la présence sur le site de réception d'un radiomètre multifréquences autoriserait une étude de la répartition spatiale de la quantité d'eau précipitable et d'accéder ainsi aux échelles d'entrée de la turbulence nuageuse.

3. Du point de vue théorique un effort particulier doit être mené dans deux directions. La première consiste à approfondir la théorie de la turbulence faible en l'adaptant aux conditions régnant dans les nuages (ou la pluie), en particulier en incluant les effets de diffusion et d'absorption. Des résultats devraient pouvoir être obtenus dans des délais raisonnables. La deuxième consiste à raffiner le modèle déterministe en utilisant une "réalisation de la turbulence" moins géométrique que celle constituée par un réseau bidimensionnel de cellules simples. Un certain nombre de travaux théoriques déjà entrepris utilisent ce type d'approche. On peut espérer ne pas rencontrer d'obstacles insurmontables.

V - QUELQUES REMEDES

Pour combattre les affaiblissement dus à la pluie, on peut prévoir une marge adéquate en augmentant le diamètre des antennes et la puissance d'émission. C'est ce que l'on fait dans les bandes 4-6 GHz avec des marges de 5 à 10 dB et dans les bandes 11-14 GHz avec des marges de 10 à 15 dB.

Cependant aux fréquences qui nous intéressent ici ces marges sont insuffisantes (10) et il faut envisager d'autres techniques pour combattre les effets des affaiblissements. Parmi celles-ci, on peut citer la diversité d'emplacement, le contrôle de la puissance montante, les antennes à pinceaux, la diversité de fréquence, la pré-correction adaptative des erreurs... Nous nous limiterons ici à la diversité d'emplacement.

En ce qui concerne la dégradation du rapport d'isolation dans les systèmes travaillant en réutilisation de fréquences sur deux polarisations orthogonales, on peut mettre en oeuvre un certain nombre de dispositifs correcteurs basés sur des principes différents suivant qu'il s'agit de dépolarisation dues à la pluie ou à la glace (104), (105). Leur description ne nous paraît pas entrer dans le cadre de ce document.

La diversité d'emplacement

Elle a été étudiée extensivement à l'aide de radiomètres, de radars ou de balises embarquées sur satellites. On trouvera de nombreuses références sur ce sujet en (87).

Elle met en jeu deux stations de réception (ou plus), séparées de quelques kilomètres, en liaison avec le même satellite. Elle est basée sur l'inhomogénéité des pluies, en particulier des pluies intenses qui sont le plus souvent dues à des cellules de petites dimensions.

On caractérise les performances d'un système en diversité d'emplacement soit par son **gain de diversité**, G_d , soit par son **facteur d'amélioration en diversité**, A_d .

Le gain de diversité est la différence, pour un pourcentage donné du temps, entre le niveau (en dB) du signal en diversité (c'est-à-dire du meilleur des signaux reçus au même instant sur les deux sites) et le niveau du signal en un site.

Le facteur d'amélioration en diversité est le rapport du temps pendant lequel un affaiblissement de niveau donné est dépassé en un site et du temps pendant lequel il est dépassé simultanément sur les deux emplacements.

Avec les notations de la **figure 21** qui schématise ces définitions, on a

$$G_d = A_s - A_j \quad (79)$$

$$A_d = P_s / P_j \quad (80)$$

Pour fixer les idées, avec les courbes de la figure on trouverait $G_d = 6$ dB à 0,01 % du temps, c'est-à-dire qu'une marge de 3 dB suffirait dans un système en diversité à assurer la même qualité de liaison qu'une marge de 9 dB dans un système n'utilisant qu'une station de réception.

D'autre part, pour un affaiblissement de 3 dB on trouve un avantage de diversité $A_d = 30$, c'est-à-dire qu'une station unique subirait une coupure à ce niveau d'affaiblissement pendant 0,3 % du temps (1 577 minutes par an) alors qu'un système en diversité ne serait coupé que pendant 0,00 % du temps (soit 53 minutes par an).

On peut fréquemment observer des avantages en diversité supérieurs à 100 en particulier dans les régions soumises à de forts orages. Dans ces régions, l'utilisation de trois stations de réception apporte une amélioration considérable (106) : avec une marge de 10 dB, la diversité à deux stations donnait à 19 GHz une disponibilité de 99,98 % alors qu'avec trois stations, une marge de 9 dB était suffisante pour atteindre une disponibilité de 99,99 %.

Dans la diversité d'emplacement le paramètre prépondérant est la distance séparant les stations (107) : pratiquement, le gain en diversité croît rapidement avec la distance puis atteint la saturation aux environs de 35 km (108).

L'orientation de la "ligne de base", c'est à dire de la droite joignant les deux stations, par rapport à la direction du satellite semble aussi jouer un rôle important (109) bien qu'il n'ait pas été mis en évidence dans un certain nombre d'expériences (Hodge (110)). On doit cependant s'attendre à ce que cette dépendance soit plus marquée aux fréquences de 20 et 30 GHz.

Le gain en diversité semble ne présenter que de faibles variations en fonction de la fréquence (110).

En tant que quantité statistique, le gain de diversité ne fournit pas d'information sur le comportement instantané de l'affaiblissement en un site ou sur les sites en diversité.

C'est pourquoi, Towner et al. (111) ont introduit le gain de diversité instantané G_i , défini par :

$$G_i(t) = A_{\max}(t) - A_{\min}(t) \quad (81)$$

$$\text{où } A_{\max}(t) = \max A_1(t), A_2(t), \dots, A_N(t) \quad (82)$$

$$A_{\min}(t) = \min A_1(t), A_2(t), \dots, A_N(t) \quad (83)$$

$G_i(t)$ est la différence entre l'affaiblissement maximum et l'affaiblissement minimum observés au même instant sur les divers emplacement en diversité.

Ce paramètre est du plus grand intérêt pour évaluer la disponibilité d'une liaison : Si, en effet, $A_S(P)$ représente l'affaiblissement dépassé en un site pendant P% du temps, il faut inclure une marge $M_S(P) = A_S(P)$ dans le bilan de liaison. Pour un système en diversité, la marge nécessaire $M_S(P)$ doit être inférieure à $M_D(P)$ d'une quantité égale au gain de diversité $G_D(A_S(P))$.

Donc

$$M_D(P) = A_S(P) - G_D(A_S(P)) \quad (84)$$

Un système en diversité fonctionne efficacement si, lorsque l'affaiblissement sur un trajet dépasse la marge, l'affaiblissement sur l'autre trajet est inférieur à cette marge. La différence des affaiblissements entre ces deux emplacements est le **gain instantané de diversité**.

De nombreux modèles de prévision des performances de la diversité d'emplacement ont été développés (108), le plus souvent en parallèle avec les modèles de prévision des affaiblissements. Il paraît logique d'améliorer ces modèles en y introduisant les caractéristiques locales de la pluie.

Il semble que pour les systèmes travaillant dans les bandes de fréquences actuellement opérationnelles, on ait, jusqu'à présent, renoncé à mettre en oeuvre la diversité d'emplacement à cause de son coût. Même dans les bandes des 20 et 30 GHz, on planifie des systèmes sans prévoir de diversité d'emplacement (112). Il n'en demeure pas moins que dans ces bandes de fréquences la situation est loin d'être claire.

VI - BILAN SUCCINCT

On peut tirer de ce qui précède le bilan résumé ci-dessous :

1- **Aux Etats-Unis et au Japon**, on dispose d'un grand nombre de données de propagation dans les bandes des 20 et 30 GHz, obtenues soit par des mesures directes à partir de balises, soit à partir de mesures indirectes telles que la radiométrie ou le radar.

Les distributions cumulatives qui ont été établies à partir de ces données révèlent une très grande variabilité annuelle. Elles ont cependant permis de se faire une idée des marges nécessaires aux équipements. Il semble qu'il faille prévoir une réception en diversité d'emplacement pour les systèmes travaillant à 30 GHz, même avec une marge de 20 dB. Par contre, dans les mêmes conditions, la diversité pourrait ne pas être nécessaire à 20 GHz.

Un résultat généralement accepté est que la probabilité conditionnelle d'affaiblissements suit une loi log-normale.

Les variations diurnes des affaiblissements sont très marquées.

La distribution des durées des affaiblissements suit une loi log-normale.

Un certain nombre de lois expérimentales dont on a donné l'expression plus haut permettent d'étudier les variations des affaiblissements en fonction de l'angle d'élévation ou de la fréquence.

En ce qui concerne le découplage de polarisation, les mesures effectuées avec ATS-6 ont mis en évidence l'importance du phénomène de dépolarisation par les cristaux de glace atmosphériques. Une étude extensive en a été faite par les chercheurs des Bell Labs.

Les formules de prévision du découplage de polarisation en fonction de l'affaiblissement de la composante copolaire donnent des résultats acceptables dans le cas de la pluie.

2 - **En Europe**, on ne possède que des résultats fragmentaires, obtenues à l'aide d'ATS-6, qui ne permettent pas de constituer une banque de données statistiquement fiables. En conséquence, un gros effort de prévision a été fait lors de l'Action COST 205, à partir des données recueillies à l'aide des satellites SIRIO et OTS dans des bandes de fréquences inférieures à 20 GHz. Ces études ont mis en évidence l'importance des corrélations entre affaiblissements copolaires et affaiblissements contrapolaires et l'insuffisance de correction du résidu de composante contrapolaire dû au système.

L'intérêt de mettre en oeuvre la diversité d'emplacement est discuté même dans les bandes des 30 GHz.

3 - **Dans tous les cas**, on peut observer que les mesures manquent de précision, notamment à cause de la détermination approximative du niveau de référence "beau temps". Aux Etats-Unis, bien que les mesures aient été effectuées sur de longues périodes, on peut s'interroger sur la valeur des statistiques effectuées puisqu'en fait, les satellites COMSTAR utilisés ont été très souvent changés de position en quatre ans.

Pour les fréquences inférieures à 20 GHz, les formules de prévision des affaiblissements à partir des intensités de précipitation donnent des résultats à peu près satisfaisants, mais ils doivent être plus amplement testés aux fréquences plus élevées.

Il faut noter que très souvent les formules concernant le comportement de plusieurs paramètres sont établies sur la base de distributions équi-probables et non de mesures conjointes instantanées.

Il faut enfin souligner le rôle très important joué par les "auxiliaires" météorologiques (pluviomètres, distromètres, et surtout radars).

VII - PERSPECTIVES

1 - Le programme "OLYMPUS"

On peut espérer améliorer considérablement nos connaissances sur la propagation dans les bandes des 20 et 30 GHz à l'aide du satellite "OLYMPUS" de l'Agence Spatiale Européenne (1) qui a été conçu pour fournir les données souhaitées de manière continue et pendant au moins dix ans.

Pour cela, la charge utile "propagation" associe :

- une balise B0 à 12,5 GHz en polarisation linéaire, qui peut éventuellement être utilisée pour la poursuite du satellite et pour établir des lois de similitude en fréquence qui pourraient permettre d'étendre dans les bandes des 20/30 GHz les diverses statistiques obtenues à 11/14 GHz lors des expériences OTS et SIRIO (17) ;
- une balise B1 à 20 GHz en polarisation linéaire commutée à 1 kHz ;
- une balise à 30 GHz en polarisation linéaire.

Les signaux émis par ces trois balises sont dérivés d'une même source.

Dans toute la zone de couverture, le découplage de polarisation dû aux imperfections des antennes doit être au minimum de 30 dB.

L'objectif global des expériences de propagation du programme "OLYMPUS" est la caractérisation statistique des canaux radioélectriques dans les bandes de fréquences situées autour de 20 et 30 GHz.

Cette caractérisation consiste en la détermination, pour diverses régions climatiques et pour des durées diverses, des fonctions de répartition des affaiblissements, du découplage de polarisation, de leur durée, de leur répartition journalière, de leur vitesse de variation, etc...

Mais l'objectif scientifique le plus ambitieux du programme "OLYMPUS" est sans conteste la détermination complète de la matrice de transfert du milieu de propagation dont la connaissance permettrait de calculer les isolations de polarisation pour des ondes incidentes de polarisation quelconque. Les caractéristiques de la balise à 20 GHz ont été choisies de façon à pouvoir effectuer cette détermination, les mesures du découplage de polarisation complexe à 30 GHz devant permettre l'établissement de lois d'extrapolation en fréquence pour les paramètres concernés.

En outre, la cohérence de phase des trois balises permet de déterminer les caractéristiques en amplitude et phase du milieu de transmission entre 12,5 et 30 GHz.

2 - Le programme de recherches de PARIS- B

Les divisions ETR et RPE du Centre Paris B ont développé un programme commun de recherches associant la station expérimentale de Gometz-la-Ville (ETR) et une station transportable, dite "petite station" (RPE).

La station de Gometz-la-Ville a les caractéristiques suivantes :

diamètre de l'antenne :	9 mètres	
	20 GHz	30 GHz
Gain :	62 dB	65,6 dB
Largeur du lobe à 3 dB :	100 millidegrés	67 millidegrés
Isolation de polarisation :	supérieure à 40 dB	

Tout en se réservant la possibilité de faire des mesures à 12,5 GHz, le dispositif mis en place à Gometz-la-Ville permettra d'acquérir l'ensemble des paramètres disponibles à 20 et 30 GHz, c'est à dire :

- à 20 GHz :

- le niveau de la composante copolaire émise en polarisation X (CPX) ;
- le niveau de la composante contrapolaire émise en polarisation X (XPX) ;
- le déphasage $\Delta\phi_X$ entre ces composantes ;
- le niveau de la composante copolaire émise en polarisation Y (CPY) ;
- le niveau de la composante contrapolaire émise en polarisation Y (XPY) ;
- le déphasage $\Delta\phi_Y$ entre ces composantes ;
- le déphasage $\Delta\phi_{XY}$ entre les composantes copolaires

- à 30 GHz :

le niveau de la composante copolaire (CPL) ; le niveau de la composante contrapolaire (XPL) ; le déphasage $\Delta\Phi$ entre ces composantes.

- à 20 et 30 GHz :

les affaiblissements différentiels et les déphasages copolaires ;

les scintillations d'amplitude.

La "petite" station a les caractéristiques suivantes :

diamètre de l'antenne :	1,30 mètre	
	20 GHz	30 GHz
Gain :	45,3 dB	48,5 dB
Largeur du lobe à 3 dB :	900 millidegrés	600 millidegrés
Isolation de polarisation :	supérieure à 35 dB.	

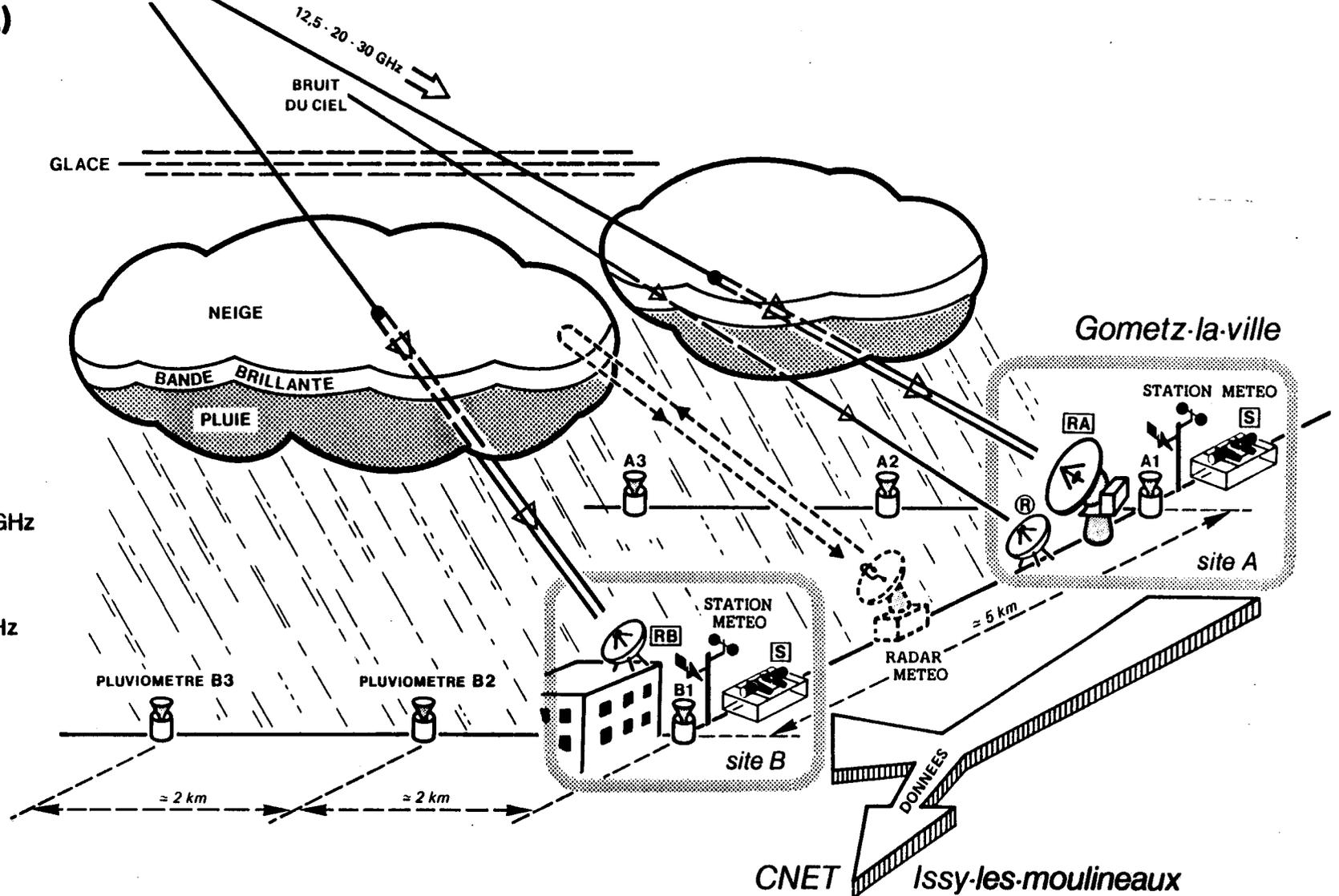
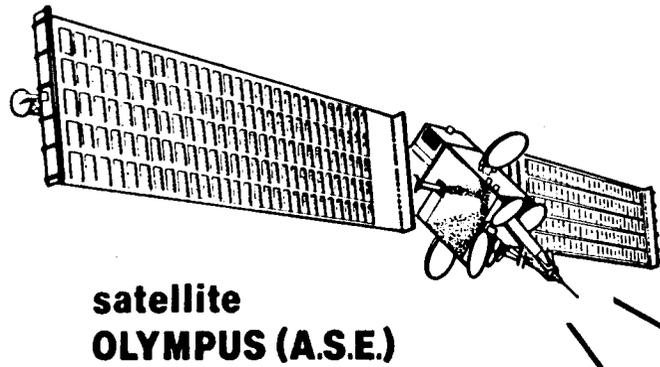
Cette station permettra d'effectuer des mesures d'affaiblissement copolaire à 20 et 30 GHz, des mesures du découplage de polarisation à 20 GHz et des mesures de scintillation d'amplitude jusqu'à 50 Hz.

A ces mesures purement radioélectriques s'ajouteront des mesures météorologiques : température, humidité, direction et intensité du vent, intensité des précipitations en plusieurs points le long de la projection du faisceau radioélectrique, distribution des dimensions des gouttes de pluie,...

Un radiomètre multifréquences dont les caractéristiques restent encore à déterminer sera mis en oeuvre sur le site de Gometz-la-Ville afin de préciser le niveau de référence des affaiblissements.

L'ensemble du dispositif expérimental est schématisé sur la figure suivante.

VUE SYNTHETIQUE DE L'EXPERIENCE FRANÇAISE



- [RA] récepteur (12,5)-20 et 30 GHz
∅ 9 m
- [RB] récepteur 20 et 30 GHz
∅ 1,30 m
- [R] radiomètre 20-24 et 30 GHz
- [S] spectropluviomètre

3 - Objectifs

On voit donc que le programme "Olympus" permettra :

- de mesurer les affaiblissements avec une grande précision et par conséquent de préciser les valeurs des rapports des affaiblissements à deux fréquences ;
- de vérifier la théorie qui prévoit que ce rapport dépend de la polarisation des ondes ;
- d'avoir des valeurs **instantanées** des découplages de polarisation, ce qui est indispensable pour étudier les performances des dispositifs de correction automatique de polarisation dans les systèmes fonctionnant en réutilisation de fréquence sur deux polarisations orthogonales ;
- d'étudier les variations du découplage en fonction de la fréquence ;
- d'étudier, grâce aux mesures précises du déphasage relatif entre signaux co et contra-polaires, les méthodes d'annulation de la composante résiduelle de transpolarisation due au système ;
- d'étudier le gain et le facteur d'amélioration en diversité et de préciser le rôle joué par l'orientation de la ligne de base ;
- de préciser les caractéristiques locales de la pluie ;
- si l'on peut disposer d'un radar, d'étudier l'extension des cellules de pluie, d'améliorer la modélisation de la bande brillante, de préciser la longueur effective L de la liaison, de vérifier la validité "européenne" des paramètres donnés par Watson dans le **tableau VI**.
- d'accroître de façon significative la banque de données relatives aux scintillations.

Signalons pour finir que le fait de disposer de deux stations permettra plus facilement de mettre en œuvre des opérations spécifiques comme l'étude de la diffusion latérale par la pluie, sujet indispensable à l'analyse des phénomènes de brouillage.

REFERENCES

- 1- OLYMPUS Propagation Experiment - Requirement for data analysis - ESTEC - OPEX 12 Juin 1986.
- 2 - L.J. IPPOLITO, Effects of precipitation on 15.3 and 31.65 GHz Earth-Space Transmission with the ATS-V satellite, Proc. I.E.E.E., vol. 59, N° 2, pp. 189-205,1971.
- 3 - L.J. IPPOLITO, Millimeter wave propagation and communications experiments at 20 and 30 GHz, I.E.E.E. Trans. on Aero. and Electron. Systems, vol. AES-11, N° 6, pp.1067-1082,1975.
- 4 - ATS-6 propagation experiments in Europe, ESA SP-131, ESTEC, 1977.
- 5 - D.C. COX, An overview of the Bell Laboratories 19 and 28 GHz COMSTAR beacon propagation experiments, Bell Syst. Tech. J., vol.,57, pp. 1231- 1255, 1978.
- 6 - N. FUGONO, Summary of millimeter wave propagation experiments using Japan's first geostationary satellite "Kiku-2", Annal. Télécommunic. 34, N° 5-6, pp.299- 318, 1979.
- 7 - K.I. TSUKAMOTO, Y. OTSU, K. KOSAKA, T. SHIOMI and H. SASAOKA, Experimental program and performance of Japan's communication satellite CS - and its first results, I.E.E.E. Trans. on Communic., Vol. COM-27, N°10, pp. 1392-1405, 1979.
- 8 - L.J. IPPOLITO, Radio propagation for space communications systems, Proc. I.E.E.E., vol. 69, N° 6, pp.697-727, 1981.
- 9 - W.L. STUTZMAN and K.M. YON, A simple rain attenuation model for earth-space radio links operating at 10-35 GHz, Radio Science, Vol.21, N°1, pp. 65-72, 1986
- 10 - S.H. LIN, H.J. BERGMANN and M.V. PURSLEY, Rain attenuation on Earth-Satellite paths - Summary of 10-year experiments and studies, Bell Syst. Tech. J., vol. 59, N° 2, pp. 183- 228, 1980.
- 11 - D.C. COX and H.W. ARNOLD, Results from the 19 and 28 GHz COMSTAR Satellite Propagation Experiment at Crawford Hill, Proc. I.E.E.E., vol. 70, N° 5, pp. 458-488, 1982.
- 12 - P.N. KUMAR, Fade duration statistics from COMSTAR 20/30 GHz beacon measurement program, Comsat Tech. Rev., vol.15, N°1, pp.71-87,1985.
- 13 - J. GOLDBIRSH, Slant Path Fade and Rain Rate Statistics Associated with the COMSTAR Beacon at 28.56 GHz for Wallops Island, Virginia over a Three-Year Period, I.E.E.E. Trans. Antennas Propagat., vol.AP-30, N°2, pp. 191-198, 1982.
- 14 - H.W. ARNOLD, D.C. COX and A.J. RUSTAKO, Rain Attenuation at 10-30 GHz Along Earth-Space Paths: Elevation Angle, Frequency, Seasonal and Diurnal Effects, I.E.E.E. Trans. Commun., vol. COM-29, N°5, pp. 716-721, 1981.
- 15 - H.W. ARNOLD, D.C. COX and H.H. HOFFMAN, Fade Duration and Interfade Interval Statistics Measured on an 19 GHz Earth-Space Path, I.E.E.E.

- Trans. Commun., vol. COM-30, N°1, pp.265-269, 1982.
- 16 - C.C.I.R.- Rapport 721-2, Affaiblissement dû aux hydrométéores, en particulier aux précipitations et autres particules atmosphériques, pp. 199-214, GENEVE, 1986.
 - 17 - COST 205, Influence de l'atmosphère sur la propagation des ondes radioélectriques sur les trajets terre-satellite à des fréquences supérieures à 10 GHz, Rapport C.E.E., 1985.
 - 18 - A.R. HOLT, R. McGUINNES and B.G. EVANS, Frequency scaling propagation parameters using dual-polarisation radar results, Radio Science, Vol. 19, N° 1, pp. 222-230, 1984.
 - 19 - S.H. LIN, Empirical rain attenuation model for Earth satellite paths, I.E.E.E. Trans on Communication, Vol. COM-27, N°5, pp. 812-817, 1979.
 - 20 - R.K. CRANE, Prediction of attenuation by rain, I.E.E.E. Trans. on Communication, Vol. COM-29, N° , pp. 1717-1733, 1980.
 - 21 - K. MORITA, Estimation methods for propagation characteristics on Earth-Satellite links in microwave and millimeter wavebands, Rev. Electron. Commun. Lab., 28, pp. 459-471, 1980.
 - 22 - R.R. PERSINGER, W.L. STUTZMAN, R.E. CASTLE and C.W. BOSTIAN, Millimeter wave attenuation prediction using a piecewise uniform rain rate model, I.E.E.E. Trans. Antennas Propagation, Vol. AP-28, N°2, pp. 149-153, 1980.
 - 23 - P. MISME and P. WALDTEUFEL, A model for attenuation by precipitation on a microwave Earth-Space link, Radio Science, Vol. 15, N° 3, pp. 655-665, 1980.
 - 24 - F. FEDI, Normalisation procedure and prediction techniques for rain attenuation on terrestrial and Earth-Space radio links, I.E.E. Conf. Pub.195-2, pp. 173-179, NEW-YORK, 1981.
 - 25 - F. MOUPFOUMA, Rain induced attenuation prediction model for terrestrial and satellite-Earth microwave links, Annales des Télécomm., Vol. 42, N° 9-10, pp. 539-550, 1987.
 - 26 - Use of Radars in Satellite-Earth Radio Propagation Studies, Proceedings of a one day workshop held at the Technical University of Graz, 24 November 1978.
 - 27 - Multiple-parameter Radar measurements of precipitation, Proceedings of URSI Commission F Open Symposium, Bournemouth, 1982.
 - 28 - G. MIE, Beiträge zur Optik trüber Medien speziell kolloidaler Metallösungen, Ann. Phys., Vol.25, pp. 377-445, 1908.
 - 29 - VAN DE HULST, Light Scattering By Small Particles, John Wiley & Sons, New-York, 1957.
 - 30 - J.O. LAWS and D.A. PARSONS, The Relationship of raindrop size to intensity, Trans. Americ. Geophys. Union, Vol. 24, pp. 452-460, 1943.
 - 31 - J.S. MARSHALL and W.M. PALMER, The distribution of raindrops with size, J. Meteor. , Vol. 5, pp. 165-166, 1948.
 - 32 - J. JOSS and A. WALDVOGEL, The variation of raindrop size distribution at Locarno, Proceedings of the International Conf. on Cloud Physics, TORONTO, pp. 369-373, 1968.

- 33 - K.L.S. GUNN and T.W.R. EAST, The microwave properties of precipitation particles, Quaterly Journ. Royal Meteorol. Soc., Vol. 80, pp. 522-545, 1954.
- 34 - R.L. OLSEN, D.V. ROGERS and D.B. HODGE, The aR^b relation in the calculation of rain attenuation, I.E.E. Trans. on Antennas and Propagation, Vol. AP-26, N° 2, pp. 318-329, 1978.
- 35 - H.R. PRUPPACHER and R.L. PITTER, A semi-empirical determination of the shape of cloud and rain drops, Journal of Atmospheric Sciences, Vol. 28, pp. 86-94, 1971.
- 36 - G. MACCHIARELLA, A comparative analysis of some prediction methods for rain attenuation statistics in Earth-to-space links, Radio Science, Vol. 20, N°1, pp. 35-49, 1985.
- 37 - M. YAMADA, Y. KARASAWA and M. YASUNAGA, An improved prediction method for rain attenuation in satellite communications operating at 10-20 GHz, Radio Science, Vol.22, N° 6, pp. 1053-1062, 1987.
- 38 - C.C.I.R., Rapport 564-3, Données sur la propagation et méthodes de prévision nécessaires pour les systèmes de télécommunication Terre-Espace, pp. 389-431, DUBROVNIK, 1986.
- 39 - M.J. LEITAO and P.A. WATSON, Method for prediction of attenuation on Earth-space links based on radar measurements of the physical structure of rainfall, I.E.E. Proceedings, Vol. 133, Part F, N° 4, pp. 429-440, 1986.
- 40 - P.A. WATSON et al. , Prediction of attenuation on satellite-earth links in the European region, I.E.E. Proceedings, Vol. 143, Part F, N°6, pp. 583-596, 1987.
- 41 - P.L. RICE and N.R. HOLMBERG, Cumulative time statistics of surface point rainfall rates, I.E.E.E. Trans. on Communication, Vol. COM-21, pp. 1131-1136, 1973.
- 42 - E.J. DUTTON, H.K. KOBAYASHI and H.T. DOUGHERTY, An improved model for Earth-space microwave attenuation distribution prediction, Radio Science, Vol. 17, N° 6, pp. 1360-1370, 1982.
- 43 - R.K. CRANE, A global model for rain attenuation prediction, EASCON 78 Record, I.E.E.E. Pub., 78 CH, 1354-4 AES, Arlington, 1978.
- 44 - R.K. CRANE and E. DEBRUNNER, Worst-month statistics, Electron. Letters, Vol.14, N° , pp. 38-40, 1978.
- 45 - G. BRUSSAARD and P.A. WATSON, Annual and worst month statistics fading on Earth-satellite paths at 11.5 GHz, Electron. Letters, vol.14, N°9, pp. 278-280, 1978.
- 46 - H. FUKUCHI, T. KOZU and S. TSUCHIYA, Worst- month statistics of attenuation and XPD on Earth-space path, I.E.E.E. Trans. on Antennas and Propagation, Vol. AP-33, N° 4, pp. 390-396, 1985.
- 47 - G. BRUSSAARD, Prediction of attenuation due to rainfall on earth-space links, Radio Science, Vol. 16, N° 5, pp. 745-760, 1981.
- 48 - K.S. Mc CORMICK, A comparison of precipitation attenuation and radar backscatter along Earth-space paths, I.E.E.E. Trans. on Antennas and Propagation, Vol. AP-20, N° 6, pp. 747-755, 1967.
- 49 - J. GOLDBIRSH and I. KATZ, Useful Experimental results for

- Earth-satellite rain attenuation modeling, I.E.E.E. Trans. on Antennas and Propagation, Vol. AP-27, N° 3, pp. 413-415, 1979.
- 50 - J. GOLDBIRSH, Predictive methods for rain attenuation using radar and in-situ measurements tested against the 28 GHz Comstar beacon signal, I.E.E.E. Trans. on Antennas and Propagation, Vol. AP- 27, N° 3, pp. 398-406, 1979.
- 51 - G. BRUSSAARD, Rain attenuation on satellite earth paths at 11.4 and 14 GHz, Ann. Télécomm. Vol. 32, N° 11-12, pp. 514-518, 1977.
- 52 - DAVIES " Diversity measurements of attenuation at 37 Ghz with sun-tracking radiometers in 3 sites network"
Proc. IEE. Vol.118, pp 737-741, 1971
- 53 - DAVIES "Radiometer measurements of atmosphere attenuation at 19 and 37 Ghz along Sun- Earth paths, Proc. IEE , Vol 120 , N° 2, pp. 159-164,1973.
- 54 - E. E. ALTSHULER, "Atmospheric attenuation at 15 and 35 Ghz for very low angles ",Radio Science, Vol 13 , N° 5, pp. 839-852, 1978.
- 55 - R. W. WILSON, "Sun tracker measurements of attenuation by rain at 16 and 30 Ghz", BSTJ, Vol. 48, N°5, pp .1383 -1404, 1969
- 56 - P.G DAVIES,"Review of SHF and EHF slant path propagation measurements made near Slough UK", I.E.E. Proc. Vol. 128, Part H, N°1, pp. 53-65,1981.
- 57 - J. FIMBEL,"Affaiblissement Terre-Satellite géostationnaire à partir de mesures radiométriques à 20 Ghz",Annales des télécom 30 , N° 5-6 1975.
- 58 - G .BRUSSARD, "Radiometry", ESA SP-1071, pp 50-66, 1985.
- 59 - FAWWAZ T. ULABY, "Microwave Remote Sensing", volume 1, pp 344-429, 1985
- 60 - T . W . TORN, "Slant-path radiometer measurements in the range 11-30 Ghz at Martlesham Heath", Conf Pub. 219, pp156-161, 1983.
- 61 - J. THIRWELL, "OTS and radiometer Slant-path measurements",
Proc. URSI Comm.F symp Lennoxville 4-3-1, pp 431-439, 1980.
- 62 - J. E. ALLNUTT,"Slant-path attenuation and space diversity results at 30 Ghz using radiometer and satellite beacon receivers ATS-6 propagation experiment in Europe", Proc. of Meeting Held at ESTEC , pp. 65-77, Nordwijk 6-7 sept 1977.
- 63 - P. SOBIESKI, Qualification of radiometric statistics by satellite-earth beacon, Proceedings URSI Comm. F Symp., pp. 151-155, Lennoxville, 1980.
- 64 - L. HANSON, "Correlating OTS beacon measurements with radiometer and rainfall data" ESA Report OTS Third year in orbit 33, pp. 33-37, 1981.
- 65 - R.R BELL, "The calibration of 20 and 30 Ghz radiometers by the ATS-6 satellite beacons" Proc of ATS-6 Meeting , ESTEC Nordwijk ESA, pp 135-148, sept 1977.

- 66 - F. DINTELMAN, "Attenuation statistics at 30 Ghz , derived from measurements with ATS-6 and simultaneous radiometric observations at 11.4 Ghz ", Proc of ATS-6 Meeting ESTEC, 6-7,pp 31-35, sept 1977.
- 67 -ZAVODY, "Effects of scattering of radiometer measurements of attenuation in rain", Elect letters G.B N° 15 , pp 328-329
- 68 - LEUNG TSANG, "Theory for microwave thermal emission from a layer of clouds or rain", IEEE Trans AP Vol 25, N° 5 pp 650-657, sept 1977.
- 69 - KARL "Rain attenuation at 15 and 35 Ghz", IEEE Trans AP ,Vol 20 N° 2 pp 181-187, 1972.
- 70 - G. BRUSSARD, Variability of atmospheric noise temperature in 11-14 Ghz band due to water and clouds, Electr. letters Vol 17, N°1, pp. 20-22, 1981.
- 71 -CHADA, "Effects of scattering in measurements of rain attenuation by passive radiometry", Electr. letters Vol 13, N°7, pp.177-178, 1977.
- 72 - R.K CRANE, "Propagation phenomena affecting satellite communication systems operating in the cm and mm wavelength bands", Proc of IEE Vol 59 , N° 2, pp 173-188, 1971.
- 73 - D.B HODGE, "The comparison between radar and radiometer derived rain attenuation for Earth- Space links", R.S Vol12 , N° 5, pp 733-740, sept 1977.
- 74 - J.M MILLET, "Determination du contenu en eau de l'atmosphère par radiométrie hyperfréquence spatiale", These, Université Paris 7, 1984.
- 75 - P.A. WATSON and M. ARBABI, Cross-polarisation isolation and discrimination, Electron. Letters, Vol.9, N° 22, pp. 516-517, 1973.
- 76 - T. OGUCHI, Attenuation of electromagnetic waves due to rain with distorted rain-drops, Journ. of the Radio Research Lab., Vol. 7, N° 33, pp. 467-485, 1960 and Part II - , Vol. 11, N° 53, pp. 19-44,1964.
- 77 - T.S. CHU, Rain induced cross-polarization at centimeter and millimeter wavelengths, Bell System Techn. Journ., vol. 53, N° 8, pp. 1557-1579, 1974.
- 78 - L.J. IPPOLITO, Radiowave Propagation in Satellite Communications, Van Nostrand & Reinhold, New-York, 1986.
- 79 - W.L. NOWLAND, R.L. OLSEN and I.P. SHKAROFSKY, Theoretical Relationship between rain depolarization and attenuation, Electron. Letters, Vol.13, N° 22, pp. 676-678, 1972.
- 80 - D.P. HAWORTH, P.A. WATSON and N.J. McEWAN, A model for the effects of electric fields on satellite earth microwave radio-propagation, Electron. Letters, Vol. 13, N° 19, pp. 562-564, 1977.
- 81 - J.P. MON, Backward and forward scattering of microwaves by ice particles: a review, Radio Science Vol. 17, N° 5, pp. 953-971, 1982.
- 82 - C. YEH, R. WOO, A. ISHIMARU and J. AMSTRONG, Scattering by single ice needles and plates at 30 GHZ, Radio Science, Vol. 17, N° 6, pp. 1503-1510, 1982.
- 83 - A. TSOLAKIS and W.L. STUTZMAN, Calculation of ice depolarization on satellite radio-paths, Radio Science, Vol. 18, N°6, pp. 1287-1293, 1983.

- 84 - T.S. CHU, Microwave depolarization on an Earth-space path, Bell Syst. Techn. Journal, Vol. 59, N° 6, pp. 987-1007, 1980.
- 85 - ATTISANI A., CAPSONI C., CARASSA F., MACCHIARELLA G., MATRICCIANI E., MAURI M., PARABONI A., PAWLINA A., POIARES-BAPTISTA J.P.V. and VANNINI C.: "The main result of the SHF-SIRIO experiment after two years activity", Alta-Frequenza, XLIX, pp. 309-918,1980.
- 86 - COX D.C., ARNOLD H.W., HOFFMAN H.H.:"Observations of cloud-produced amplitude scintillation on 19- and 28-GHz earth-space paths" Radio Sci.,16,5,pp 885-907,1981.
- 87 - DAVIES P.G., NORBURY J.R.: "Review of slant path propagation mechanisms and their relevance to systems performance", IEE Proceed., F,130,7, pp. 665-678,1983.
- 88 -TITUS J.M., ARNOLD H.W.: "Low-elevation-angle propagation effects on COMSTAR satellite signals", B.S.T.J. ,61,7, pp. 1567-1571,1982.
- 89 - VILAR E., HADDON J., LO P., MOUSLEY T.J.:" Measurement and modelling of amplitude and phase scintillations in an earth-space path", Jour. of. IERE, 55, 3, pp. 87-96, 1985.
- 90 - VANHOENACKER-JANVIER D.:"Modèle radioélectrique pour la scintillation observée aux hyperfréquences sur les liaisons satellite-terre", Thèse, Université Catholique de Louvain, 1987.
- 91 - BASILI P., CIOTTI P., D'AURIA G., FIONDA E., MERLO U., FERRAZOLI P., SOLIMINI D., WANG J.:"Results from studies on scintillation based on the SIRIO experiment" Alta frequenza, LVI,1-2, pp. 69-77,1987.
- 92 - ORTGIES,G.:"Probability density function of amplitude scintillations", Electron. Letters, 21,4, pp. 141-142, 1985.
- 93 - MOUSLEY T.J., VILAR E.:"Experimental and theoretical statistics of microwave amplitude scintillations on satellite down-links",IEEE Trans, AP-30, N°6, pp. 1099-1106,1982.
- 94 - ORTGIES G., RÜCKER F.:"Diurnal and seasonal variations of OTS amplitude scintillations", Electron. Letters, 21,4, pp.143-144,1985.
- 95 - WANG C.N., CHEN F.S., LIU C.H., FANG D.J., "Tropospheric amplitude scintillations at C-band along satellite up-link", Electron. Letters, Vol. 20, N°2, pp. 90-91,1984.
- 96 - VILAR E., HADDON J.:"Measurement and modelling of scintillation intensity to estimate turbulence parameters in an earth-space path", IEEE Trans, AP-32, 4, pp. 340-346, 1984.
- 97 - LO,P.S.L., BANJO O.P., VILAR E.:"Observations of amplitude scintillations on a low-elevation earth-space path", Electron letters, 20, pp. 307-308,1984.
- 98 - CRANE R.K., BLOOD D.W.:"Handbook for the estimation of microwave propagation effect-link calculations for earth-space paths", NASA GFSC Contract NASA-25341, 1979.
- 99 - TATARSKI V.I.:"Wave propagation in a turbulent medium",Dover, N.Y. 1961.
- 100 - ISHIMARU A.:"Wave propagation and scattering in random media",Vol I et II, Academic Press, NY, 1982.

- 101 - OTT R.H., THOMPSON Jr. M.C.: "Atmospheric amplitude spectra in an absorption region", IEEE Trans, AP-26, N°2, pp. 329-332, 1978.
- 102 - MACPHERSON J.I., ISAAC G.A.: "Turbulent characteristics of some canadian cumulus clouds", Journ. Appl. Meteor., 16,1, pp. 81-90, 1977.
- 103 - PANCHEV S.: "Random functions and turbulence" Pergamon Press, 1971.
- 104 - M. YAMADA, H. YUKI, K. INAGAKI, S. ENDO and N. MATSUNAKA, Compensation techniques of rain depolarization in satellite communications, URSI XXth General Assembly, Session F4, pp. 1 -11, WASHINGTON, 1981.
- 105 - N.J. Mc EWAN and M.S. MAHMOUD, One parameter adaptive cancellation technique for satellite microwave links, Electron. Letters, Vol. 14, N° 19, pp. 624-625, 1978.
- 106 - D.D. TANG and D. DAVIDSON, Diversity reception of COMSTAR satellite 19/29 GHz beacons with the Tampa Triad, Radio Science, Vol. 17, N° 6, pp. 1477-1488, 1982.
- 107 - D.B. HODGE, An empirical relationship for path diversity gain, I.E.E.E. Trans. on Antennas and Propagation, Vol. AP-24, N° 3, pp. 250-251, 1976.
- x 108 - J. GOLDHIRSH, Space diversity performance prediction for Earth-Satellite paths using radar modelling techniques, Radio Science, Vol. 17, N° 6, pp.1400-1410, 1982.
- 109 - J. MASS, Diversity and baseline orientation, I.E.E.E. Trans. on Antennas and Propagation, Vol. AP-27, N° 1, pp. 27-30, 1979.
- 110 - D.B. HODGE, The characteristics of millimeter wavelength satellite to ground space diversity links, I.E.E. Conf. Pub. n° 98, pp. 28-32, 1973.
- 111 - C. TOWNERS, C.W. BOSTIAN, W.L. STUTZMAN and T. PRATT, Instantaneous diversity gain in 10-30 GHz satellite systems, I.E.E.E. Trans. on Antennas and Propagation, Vol. AP-32, N° 2, pp. 206-208, 1984.
- 112 - F. MARCONICCHIO and F. VALDONI, The Italsat Programme, Space Commun. & Broadcasting, 1, pp. 199-204, 1984.

Tableau I

Satellites utilisés pour des études de propagation dans les bandes des 20/30 GHz

Satellites	Lancement	Localisation	Fréquences (en GHz)		Polarisation	Modulation
			Montante	Descendante		
ATS-5 (Etats-Unis)	Août 1969	104° Ouest	31,6	15,3	linéaire	± 1 à ± 50 MHz
ATS-6 (Etats-Unis)	Mai 1974	95° Ouest 35° Est (Juin 75) 105° Ouest (Nov. 76)	13,2 17,7	20 30	linéaire	± 180 MHz
COMSTAR D1 (Etats-Unis)	Mai 1976	128° Ouest 95° Ouest (Août 78)		19 28	linéaire commutée	± 264 MHz
COMSTAR D2 (Etats-Unis)	Juillet 1976	95° Ouest		19 28	"	"
ETS-II (Japon)	Février 1977	130° Est		1,7 11,5 34,5	circulaire	
C.S. (Japon)	Décembre 1977	135° Est	27,55 30,55	17,75 20,25	circulaire	
COMSTAR D3 (Etats-Unis)	Juin 1978	87° Ouest		19 28	linéaire commutée	± 264 MHz
COMSTAR D4 (Etats-Unis)	Février 1981	127° Ouest		"	"	"

Tableau II

Affaiblissements (en dB) à 20 GHz dépassés pour un pourcentage donné de temps

	Stations	Angle de Polarisation	Elévation	Nombre de Mois	1 %	0,3 %	0,1 %	0,03 %	0,01 %	0,003 %	0,001 %
ETATS-UNIS (19,04 GHz)	Crawford Hill	86°	18°5	24	2,5	6,8	11,5	25,0			
	Clarksburg	86°	21°	12	1,0	3,9	8,8	16,2	22,5		
	"	4°	21°	12		5,0	10,0	19,0	25,0		
	Grant Park	90°	27°3	12			9,7	25,4			
	Palmetto	90°	29°9	12		5,4	11,0	25,0			
	Waltham	75°	38°2	12		2,1	3,9	7,5	13,1	18,7	
	Crawford Hill	69°	38°6	12	1,0	3,4	6,0	12,8	21,5		>44
	"	21°	38°6	12		3,3	5,5	13,6	23,3		
	Clarksburg	69°	41°	12			5,7	12,9	25,0		
	"	21°	41°	12			3,2	7,5	16,7	27,5	
	Grant Park	90°	41°8	12				10,0	22,4		
	Clarksburg	88°3	43°5	24	0,75	5,0	9,6	16,1	23,7		
	"	1°7	43°5	24	3,1	6,7	11,4	17,2			
	Blacksburg	37°7	45°	32		5,0	6,0	11,0	19,0	26,0	30,0
	"	52°5	45°	32	2,0	3,4	5,1	10,0	16,9	23,8	
	Palmetto	90°	49°5	12			9,7	21,3	>30		
Austin	90°	52°	23		1,0	2,5	6,5	17,0	24,0		
Tampa	80°	56°5	29		1,5	10,0					
JAPON (18,5 GHz)	Wakkanai	Circulaire	37°	12	>1		2,9		8,4		14,3
	Sendai	"	45°	12	3		7		18		
	Yokohama	"	48°	24	4		8		16		
	Kashima	"	48°	36	1,8	3,6	6,1	10,5	17,2		
	Yokosura	"	48°	24	3		7		27		
	Yamagawa	"	53°	12	2		10		17		

Tableau III

Affaiblissements (en dB) à 30 GHz dépassés pour un pourcentage donné de temps

	Stations	Angle de Polarisation	Elévation	Nombre de Mois	1 %	0,3 %	0,1 %	0,03 %	0,01 %	0,003 %	0,001 %
ETATS-UNIS (28,56 GHz)	Clarksburg	86°	21°	12	3,4	8,2	15,9	27,5			
	Grant Park	90°	27°3	12		8,8	17,6				
	Palmetto	90°	29°9	12		10,6	21,8				
	Waltham	75°	38°2	12	4,1	9,8	18,9				
	Crawford Hill	69°	38°6	12	3,2	7,5	13,5	28,1	44,0		
	Clarksburg	69°	41°	12		5,3	13,6	24,7			
	Grant Park	90°	41°8	12		8,0	20,0				
	Clarksburg	88°3	43°5	24	4,5	10,2	17,5	26,7			
	Wallops Island	90°	43°5	36		7,3	15,5				
	Blacksburg	52°5	45°	40	5,5	8,3	12,1	19,7	27,7		
	Palmetto	90°	49°5	12		8,8	19,2				
	Austin	90°	52°	23	1,5	6,0	15,0	32,0			
	Tampa	82°	57°	12	4,4	23,5					
JAPON (34,5 GHz)	KASHIMA	Circulaire	46°5	12	4,7	10,4					

Tableau IV (4)

**Affaiblissements (en dB) à 20 GHz dépassés en Europe
pour un pourcentage donné du temps**

Stations	Elévation	Heures d'observation	0,1 %	0,03 %	0,01 %
Martlesham	22°7	1025	6	8	9
Bradford	20°	920	4	5	6,5
Gometz-la-Ville	25°9	1100	4	6	8,5

Tableau V (4)

Affaiblissements (en dB) à 30 GHz dépassés en Europe
pour un pourcentage donné du temps

Stations	Elévation	Heures d'observation	1 %	0,03 %	0,1 %	0,03 %
Martlesham	22°7	1141	5	7,5	11	17
Slough	22°4	1742	3	5	10	11
Langley	22°4	1742	3	6	10	13
Winkfield	22°4	1742	3	7	11	14
Leeheim	27°5	1200	3	6	10	17,5
Eindhoven		262	8	9,5	11	12

Tableau VI (12)

a) Statistiques annuelles des durées des affaiblissements à 19,04 GHz
en polarisation horizontale

Durée des affaiblissements (minutes)	Pourcentage de la durée totale des affaiblissements observés au-dessous de					
	3 dB	6 dB	10 dB	15 dB	20 dB	25 dB
> 3	95,7	91,9	91,1	93,6	91,2	89,7
> 10	81,6	72,4	69,7	71,4	85,6	78,4
> 30	53,8	29,0	39,6	17,0	38,1	–
> 60	17,5	6,1	–	–	–	–
Durée totale des affaiblissements (minutes)	2.196	1.024	514	297	114	24
Nombre total d'affaiblissements	183	125	66	43	12	7

b) Statistiques annuelles des durées des affaiblissements à 28,56 GHz
en polarisation verticale

Durée des affaiblissements (minutes)	Pourcentage de la durée totale des affaiblissements observés au-dessous de					
	3 dB	6 dB	10 dB	15 dB	20 dB	25 dB
> 3	96,9	95,6	92,6	89,3	93,1	91,1
> 10	86,1	76,2	71,6	68,9	69,6	81,2
> 30	68,7	56,0	35,4	40,2	35,4	18,3
> 60	57,1	45,5	5,6	11,0	19,6	–
Durée totale des affaiblissements (minutes)	5.366	2.391	1.188	511	310	167
Nombre total d'affaiblissements	333	220	141	79	37	24

Tableau VII (39)

**Constantes du modèle pour différents types de pluie
et pour diverses polarisations**

Fréquence (GHz)	Polarisation	Constantes du modèle				
		s	t	u	v	w
Pluies stratiformes						
20	H	1,53	-0,212	1,171	-0,509	1,200
20	V	1,39	-0,198	1,135	-0,470	1,147
30	H	3,64	-0,166	1,118	-0,413	1,113
30	V	3,28	-0,182	1,094	-0,430	1,088
Pluies orageuses						
20	H	1,90	-0,441	1,290	-0,486	1,162
20	V	1,58	-0,417	1,222	-0,444	1,094
30	H	3,92	-0,389	1,180	-0,410	1,051
30	V	3,38	-0,375	1,134	-0,428	1,028

Tableau VIII (40)

Différences ΔH_M entre la hauteur moyenne annuelle et la hauteur moyenne mensuelle de l'isotherme 0°C

Mois	ΔH_M
Janvier	- 990
Février	- 895
Mars	- 750
Avril	- 575
Mai	+ 85
Juin	+ 770
Juillet	+1150
Août	+1165
Septembre	+ 835
Octobre	+ 340
Novembre	- 375
Décembre	- 750

(L'erreur quadratique moyenne sur ces valeurs est typiquement de 150 m environ)

(78)
Tableau IX

**Découplages de polarisation à 20 et 30 GHz dépassés
pendant un pourcentage donné du temps**

Station	Fréquence (GHz)	Angle d'élévation	Polarization C, L (τ°)	Période	XPD observé pour un % donné de l'année		
					0.001 %	0.01 %	0.1 %
Holmdel, NJ	19	39°	L(21°)	5/77-5/78	>10	16	24
	19		L(69°)	5/77-5/78	>10	18	25
	28.6		L(69°)	5/77-5/78	—	12	22
Blacksburg, VA	28.6	45°	L(60°)	1/78-12/78	9.5	13	15
				1/79-6/79	7	12.5	18
Kashima, Japan	34.5	47°	C	5/77-4/78	—	17	22
	19.5	48°	C	8/79-7/80	—	20	26
Yokohama, Japan	19.5	48°	C	4/79-3/80	—	17	21

TABLEAU X

Principales expériences (les caractéristiques absentes ne sont pas mentionnées dans les articles)

Satellite	Pays	Fréquences	Polarisation	Elévation	Antenne	Cadence	Durée
Comstar	USA	19 et 28GHz	deux	$\approx 40^\circ$	≈ 7 et 0,6m	4 s^{-1}	7 et 8/78 et 79
OTS-2	ASE	11 et 14GHz	une	$\approx 30^\circ$	3-4	de 1 à 7 Hz	81 et 82
ATS6	USA	2 à 30GHz		0,4 à 44°		10Hz	qq mois épars
SIRIO	ITA	11 et 17 GHz		20 à 33°	3 à 17m		8/77à2/85

FIGURE 1 Distribution cumulative des affaiblissements mesurés à 19 GHz et variations journalières. [14]

FIGURE 2 Histogramme des pourcentages de temps pendant lesquels les niveaux d'affaiblissements à 29 GHz de 5, 10, 24 dB sont dépassés par tranches horaires de 4 heures, pour une durée de trois ans. [13]

FIGURE 3 Définition schématique sur un événement idéalisé de la durée d'un affaiblissement et de l'intervalle de temps séparant deux affaiblissements avec et sans hystérésis. [15]

FIGURE 4 Distribution de la durée des affaiblissements à 19 GHz pour des profondeurs allant de 5 à 40 dB, avec ou sans hystérésis. [11]

FIGURE 5 Distribution des intervalles entre affaiblissements à 19 GHz pour des profondeurs allant de 5 à 40 dB, avec ou sans hystérésis. [11]

FIGURE 6 Carte des affaiblissements dépassés pendant 0,01% d'une année moyenne en Europe, prévue pour la balise à 20GHz du satellite OLYMPUS, en polarisation à peu près horizontale. [40]

FIGURE 7 Représentation schématique du réseau de pluviomètres mis en œuvre à Rosman (E.U.) lors des expériences ATS-5 et ATS-6. [2]

FIGURE 8 Comparaison des distributions cumulatives des affaiblissements à 19,5 GHz mesurées pendant 4 ans à Kashima, pour l'année entière et pour le mois le plus défavorable. [46]

FIGURE 9 Définition des champs électriques copolaires et contrapolaires intervenant dans le découplage de polarisation et le rapport d'isolation. [78]

FIGURE 10 Représentation classique d'une goutte de pluie ellipsoïdale inclinée, pour l'étude de la dépolarisation. [78]

FIGURE 11 Distributions cumulatives des découplages de polarisation à 19 GHz dus à la glace et à un mélange glace-pluie. [11]

FIGURE 12 Scintillations sèches (a) et humides (b) observées à l'aide du satellite COMSTAR. [86]

FIGURE 13 Densité de probabilité des écarts d'amplitude par rapport à la valeur moyenne (a) valeurs mesurées, (b) distribution gaussienne, (c) distribution bi-gaussienne. [94]

FIGURE 14 Exemple d'évolution journalière de l'indice de scintillation à 11,6 GHz à Rome; comparaison avec la température mesurée au sol. [91]

FIGURE 15 Distribution cumulée des variances de Juin à Décembre 1983. [94]

FIGURE 16 Spectre des scintillations sèches (courbe 1) et humides (courbe 2) observées à Louvain-la-Neuve. [90]

FIGURE 17 Comparaison des scintillations observées sur deux antennes différentes (7m et 0,6m). [86]

FIGURE 18 Variance de l'amplitude moyenne des scintillations à 2 et 30 GHz mesurées à Columbus (Ohio) pour des angles d'élévation allant de 0,38 à 44°. [78]

FIGURE 19 Contour de la densité conjointe de scintillations sèches à 19 et 28 GHz. [86]

FIGURE 20 Exemple de distorsion dans la bande à partir d'un modèle déterministe de ciel nuageux. [90]

FIGURE 21 Définition du gain et de l'amélioration de diversité. [78]

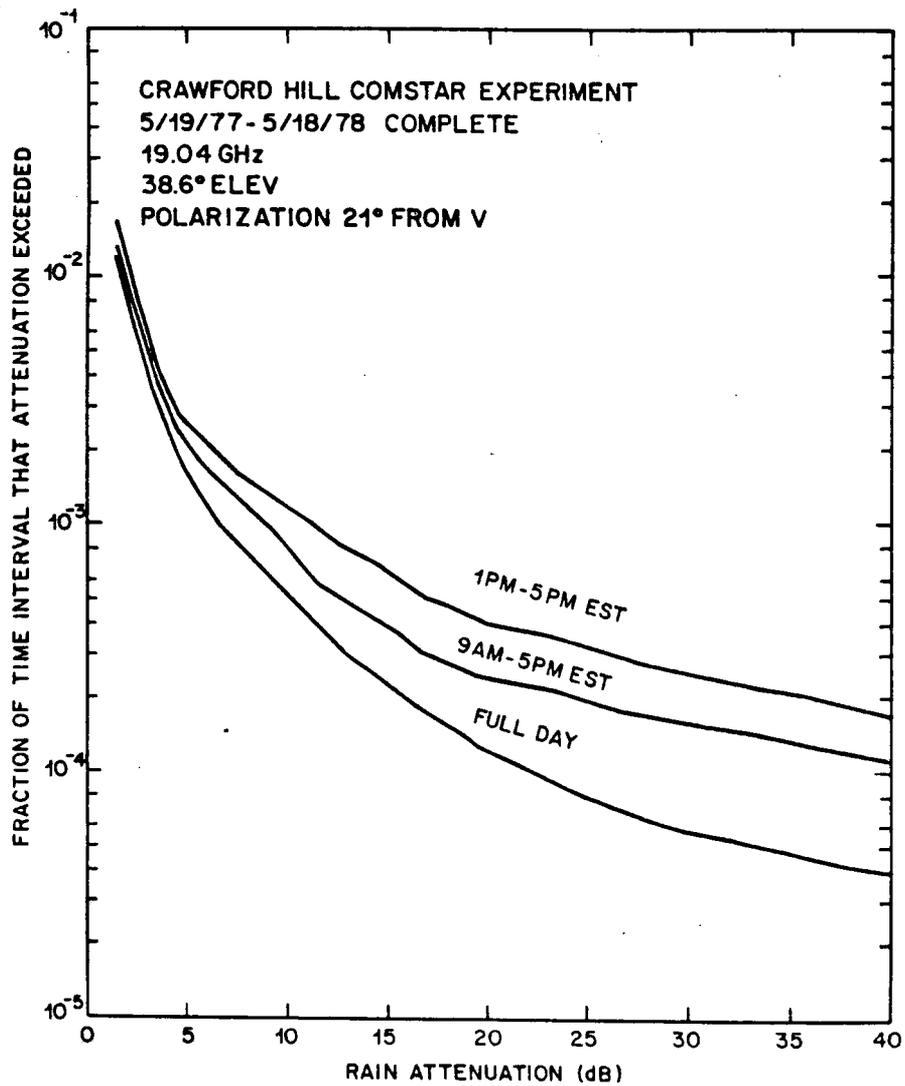


FIGURE 1 Distribution cumulative des affaiblissements mesurés à 19 GHz et variations journalières.

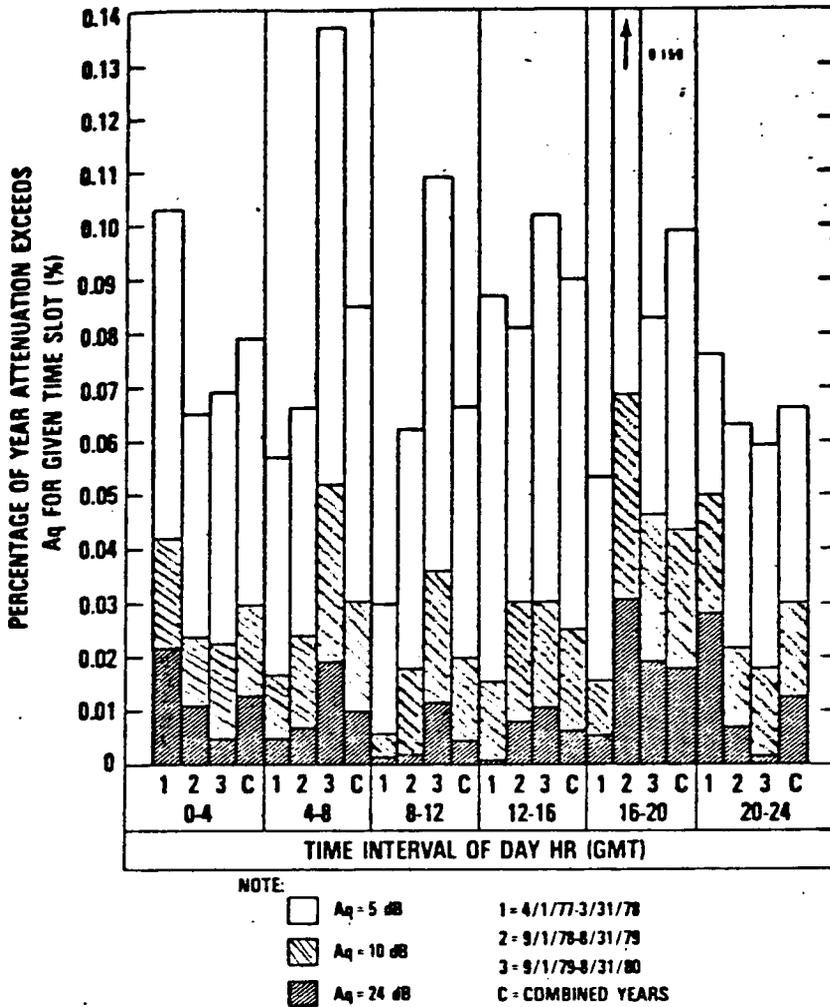


FIGURE 2 Histogramme des pourcentages de temps pendant lesquels les niveaux d'affaiblissements à 29 GHz de 5, 10, 24 dB sont dépassés par tranches horaires de 4 heures, pour une durée de trois ans.

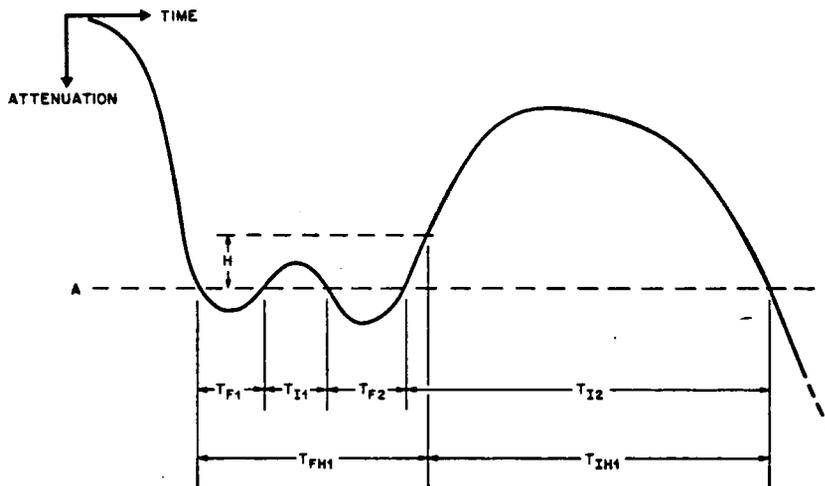


FIGURE 3 Définition schématique sur un événement idéalisé de la durée d'un affaiblissement et de l'intervalle de temps séparant deux affaiblissements avec et sans hystérésis.

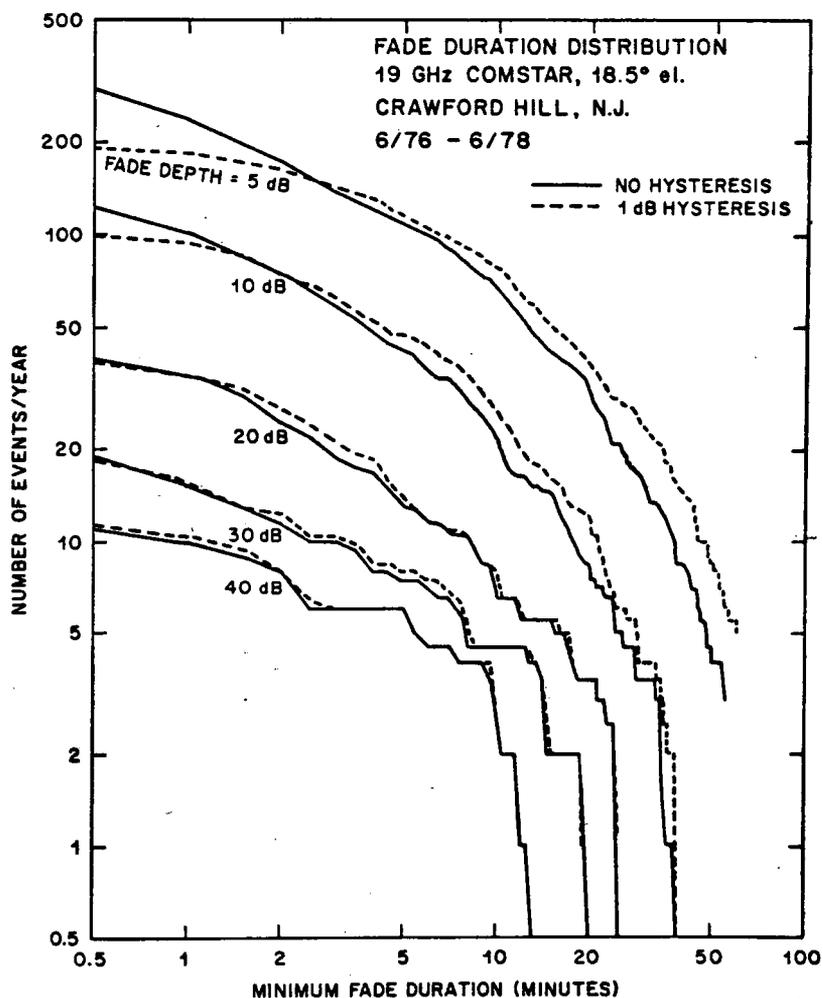


FIGURE 4 Distribution de la durée des affaiblissements à 19 GHz pour des profondeurs allant de 5 à 40 dB, avec ou sans hystérésis.

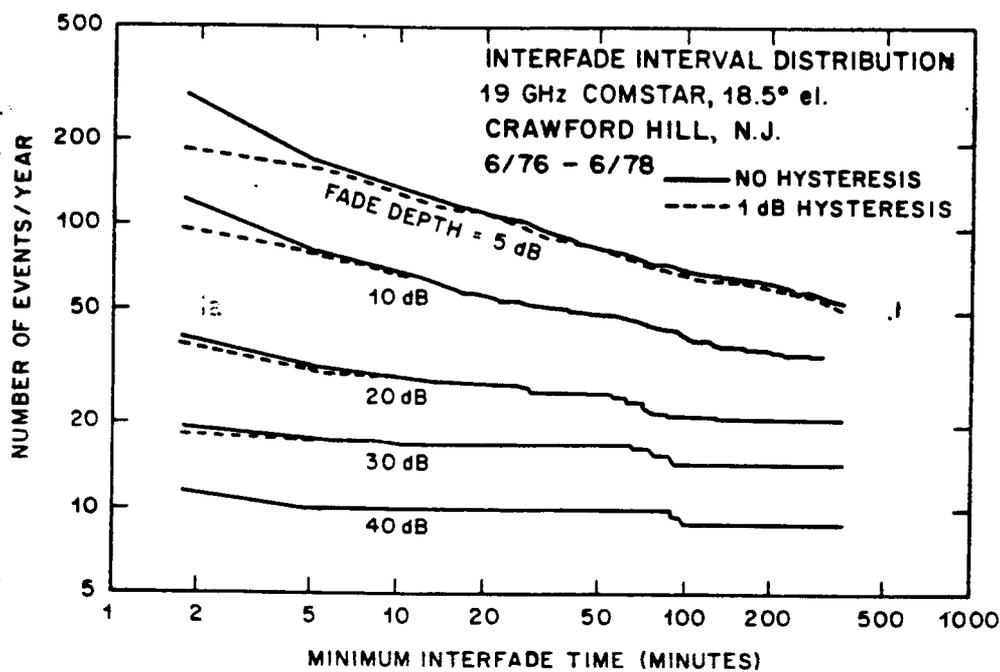


FIGURE 5 Distribution des intervalles entre affaiblissements à 19 GHz pour des profondeurs allant de 5 à 40 dB, avec ou sans hystérésis.

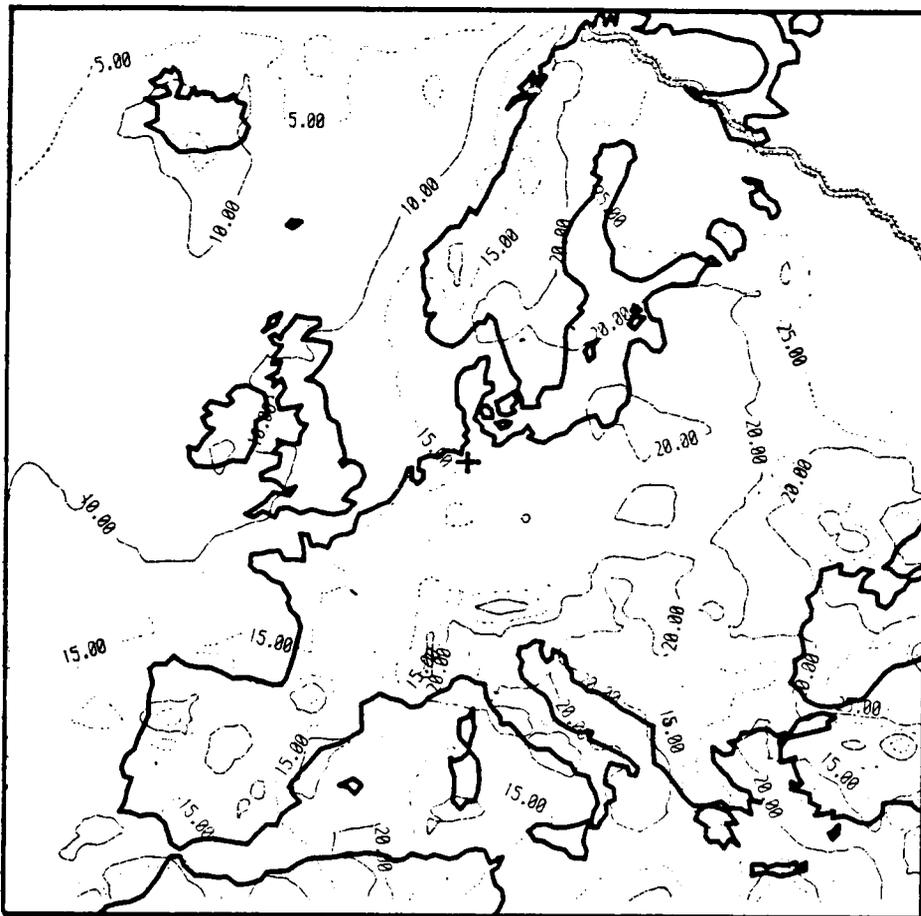


FIGURE 6 Carte des affaiblissements dépassés pendant 0,01% d'une année moyenne en Europe, prévue pour la balise à 20GHz du satellite OLYMPUS, en polarisation à peu près horizontale.

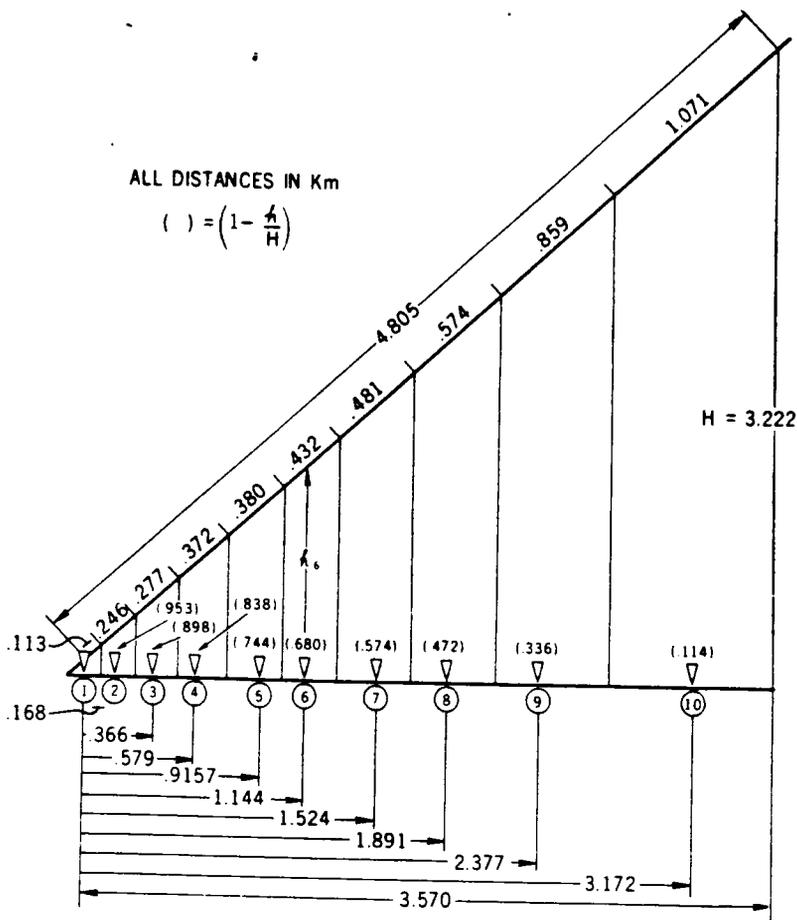


FIGURE 7 Représentation schématique du réseau de pluviomètres mis en œuvre à Rosman (E.U.) lors des expériences ATS-5 et ATS-6.

19.5GHz April 1978 - March 1982

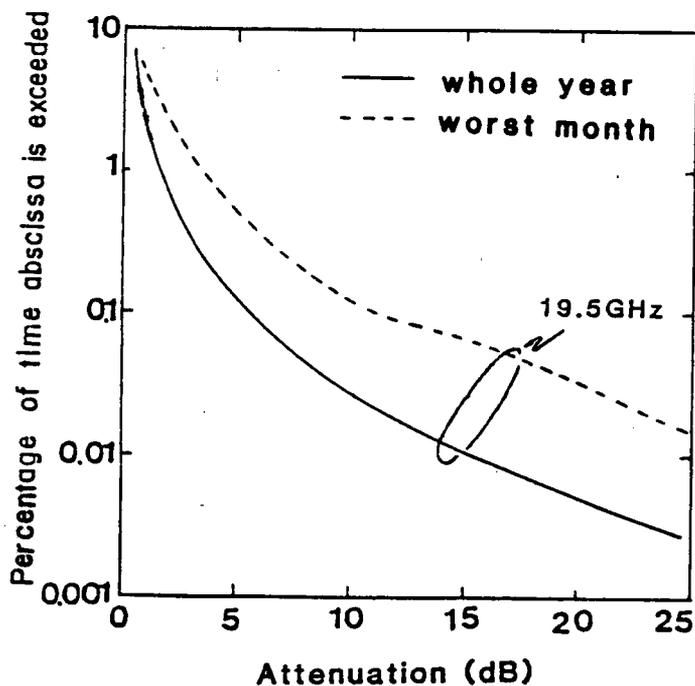


FIGURE 8 Comparaison des distributions cumulatives des affaiblissements à 19,5 GHz mesurées pendant 4 ans à Kashima, pour l'année entière et pour le mois le plus défavorable.

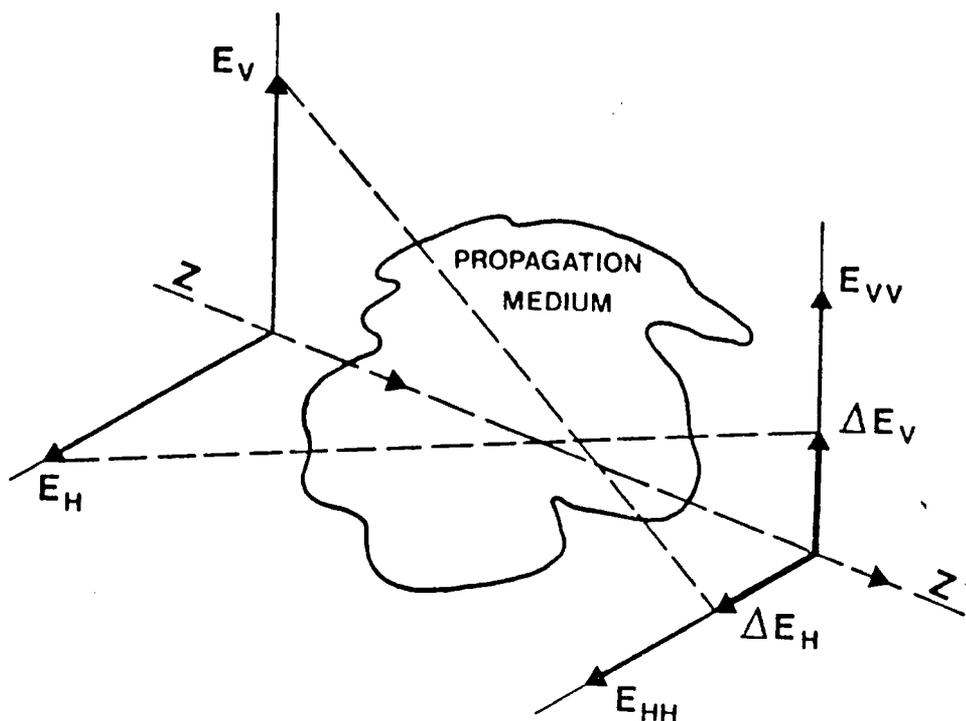


FIGURE 9 Définition des champs électriques copolaires et contrapolaires intervenant dans le découplage de polarisation et le rapport d'isolation.

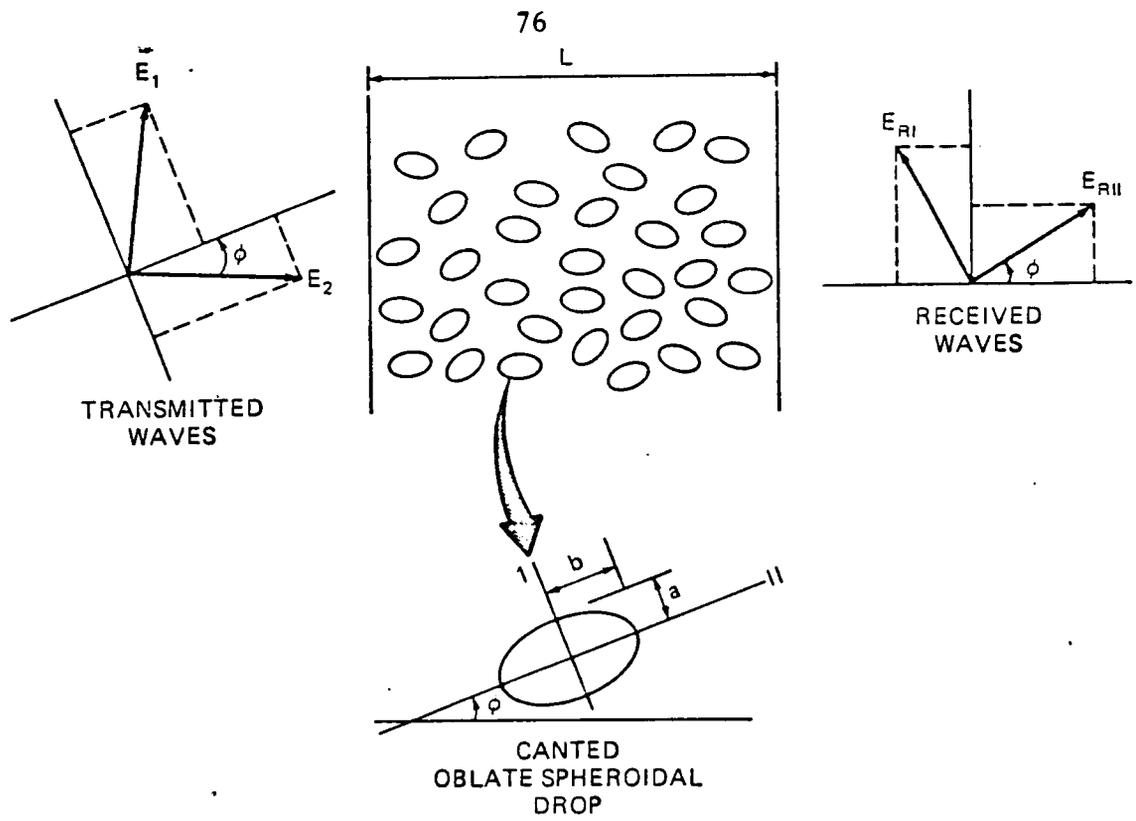


FIGURE 10 Représentation classique d'une goutte de pluie éllipsoïdale inclinée, pour l'étude de la dépolarisation.

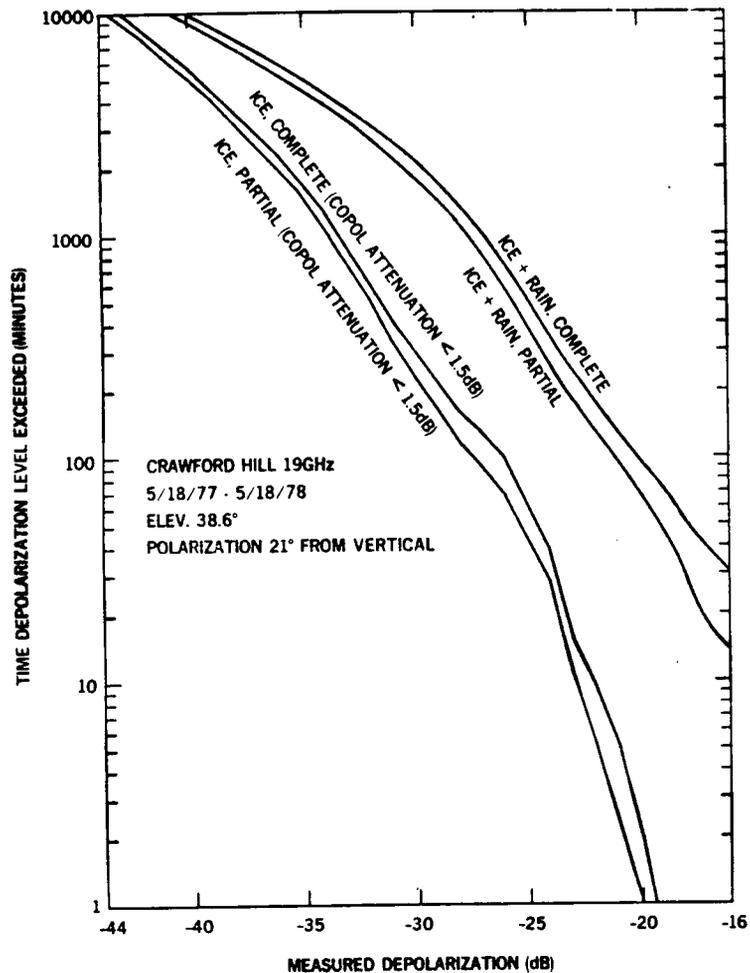
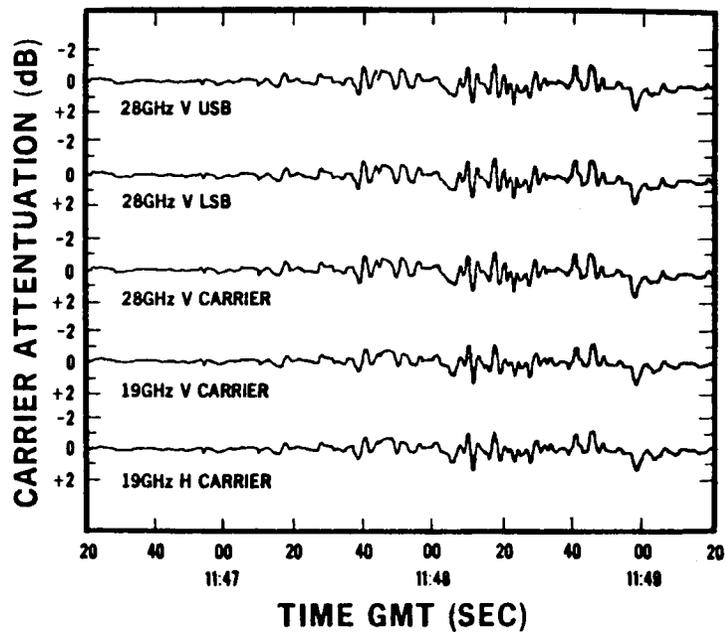


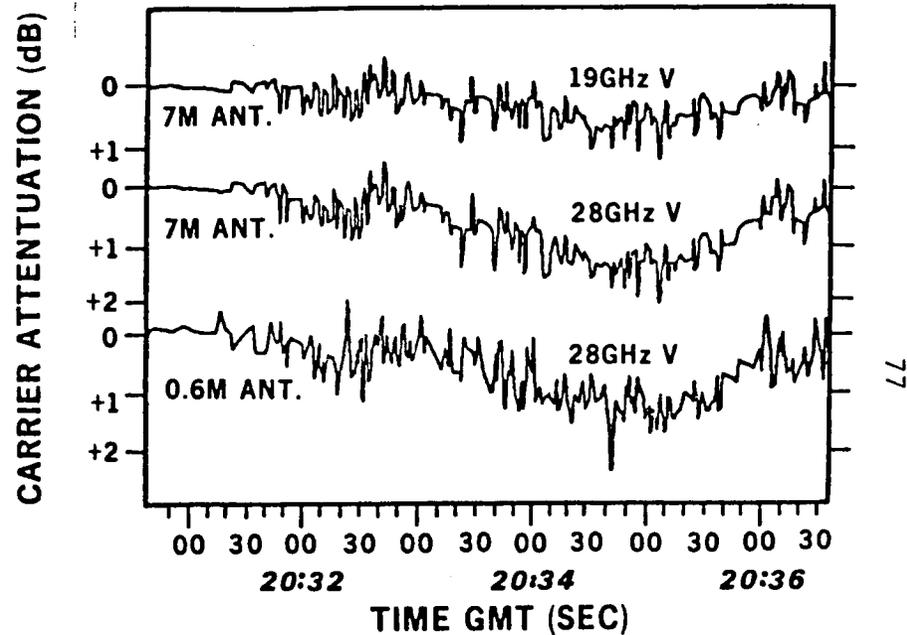
FIGURE 11 Distributions cumulatives des découplages de polarisation à 19 GHz dus à la glace et à un mélange glace-pluie.

CRAWFORD HILL 8/1/77 ELEV. 38.6°
7M ANT.



a)

CRAWFORD HILL
7/24/79 ELEV. 41.5°



b)

FIGURE 12 Scintillations sèches (a) et humides (b) observées à l'aide du satellite COMSTAR.

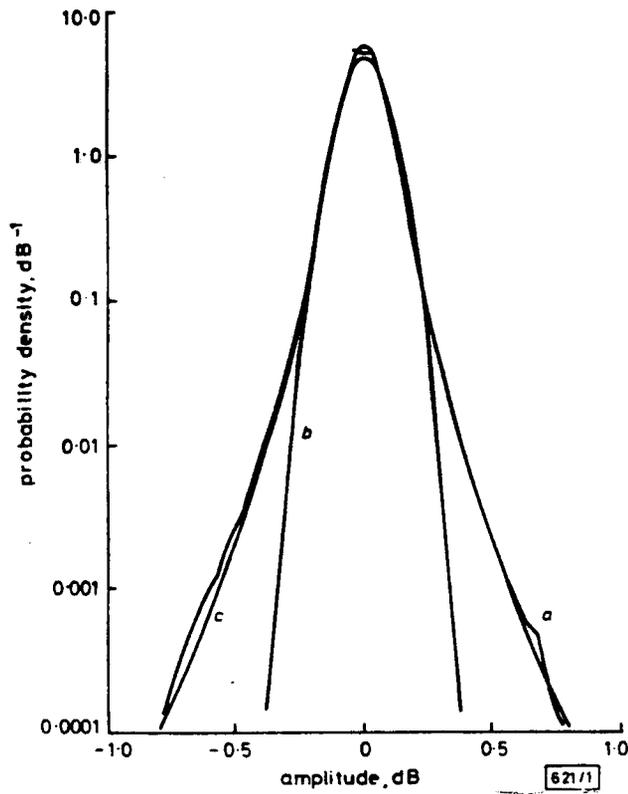


FIGURE 13 Densité de probabilité des écarts d'amplitude par rapport à la valeur moyenne (a) valeurs mesurées, (b) distribution gaussienne, (c) distribution bi-gaussienne.

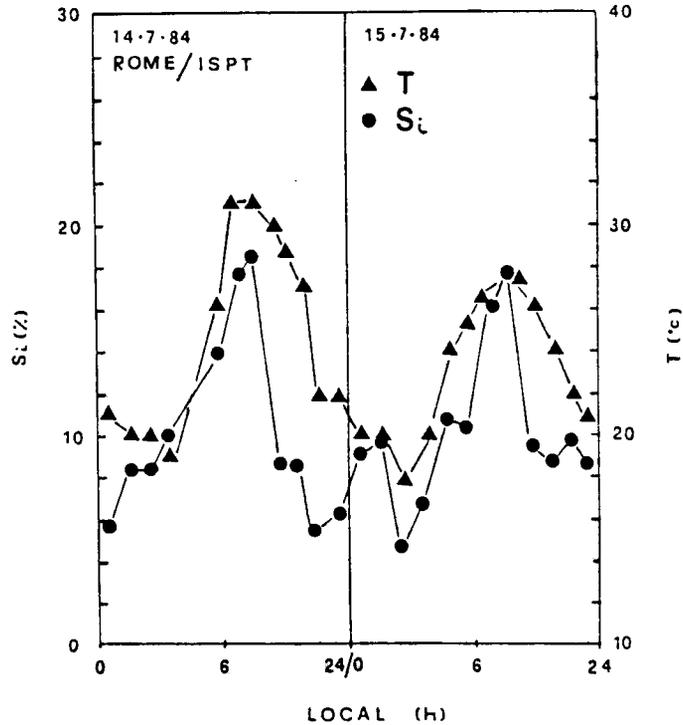


FIGURE 14 Exemple d'évolution journalière de l'indice de scintillation à 11,6 GHz à Rome; comparaison avec la température mesurée au sol.

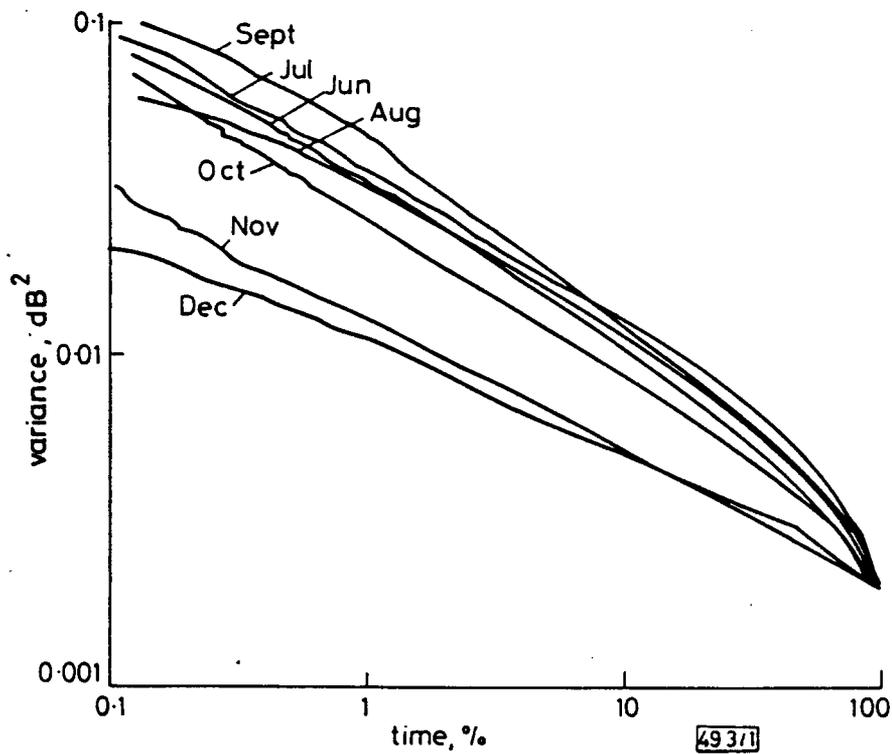


FIGURE 15 Distribution cumulée des variances de Juin à Décembre 1983

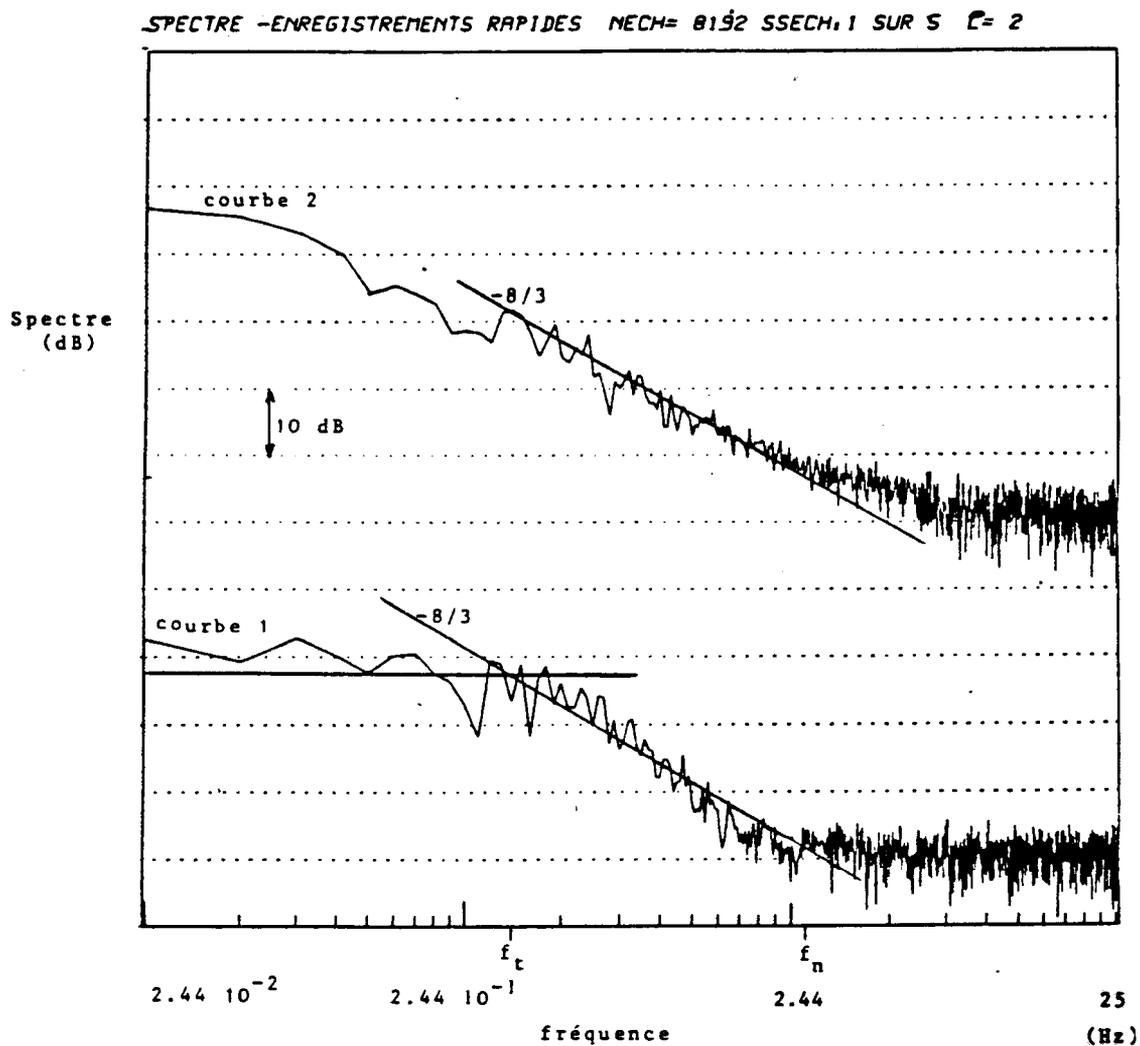


FIGURE 16 Spectre des scintillations sèches (courbe 1) et humides (courbe 2) observées à Louvain-la-Neuve.

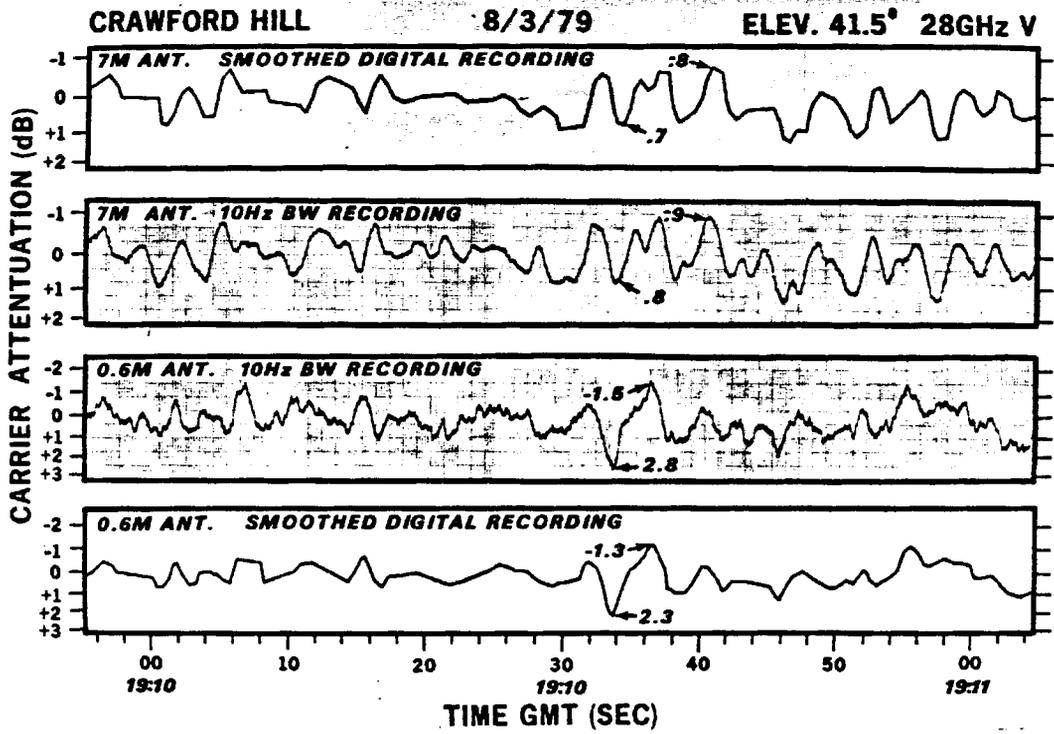


FIGURE 17 Comparaison des scintillations observées sur deux antennes différentes (7m et 0,6m).

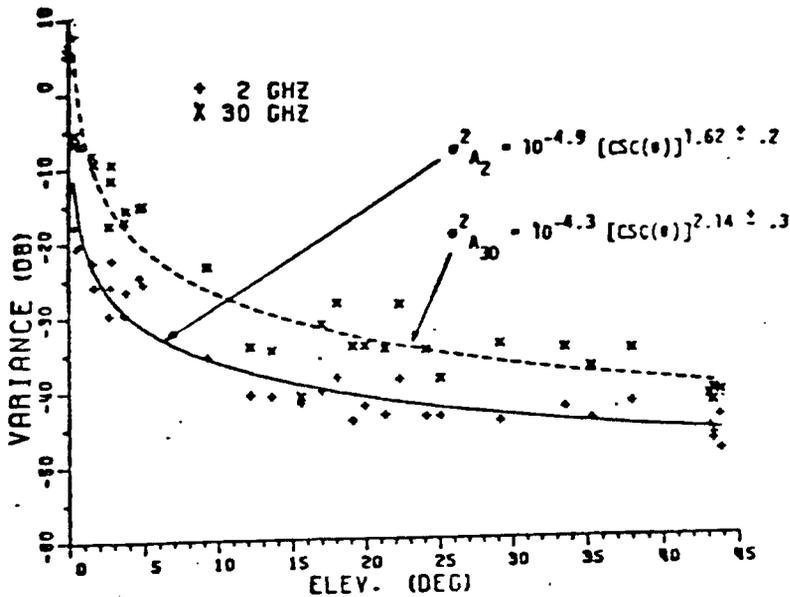


FIGURE 18 Variance de l'amplitude moyenne des scintillations à 2 et 30 GHz mesurées à Columbus (Ohio) pour des angles d'élévation allant de 0,38 à 44°.

CLOUD-PRODUCED SCINTILLATION

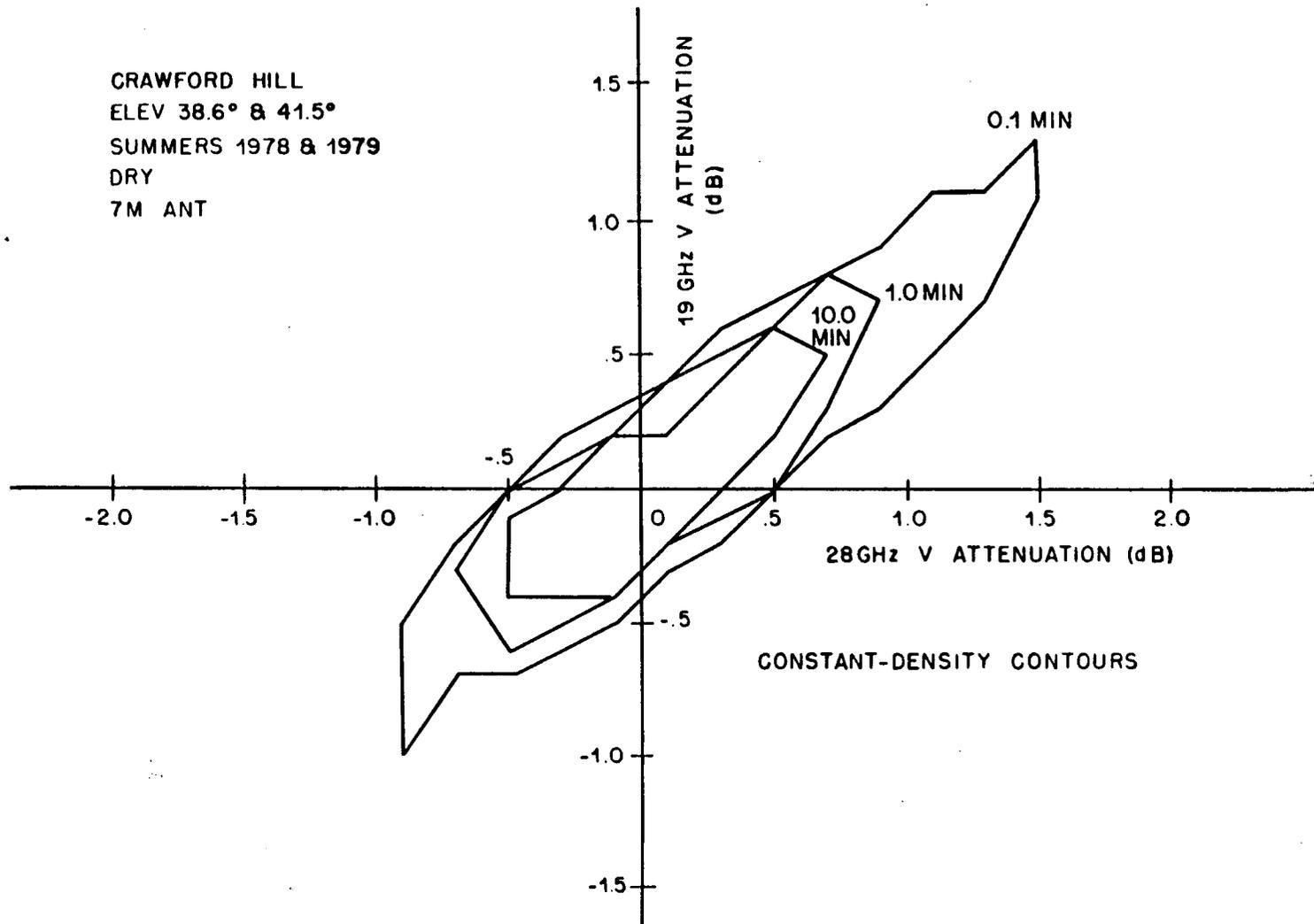


FIGURE 19 Contour de la densité conjointe de scintillations sèches à 19 et 28 GHz.

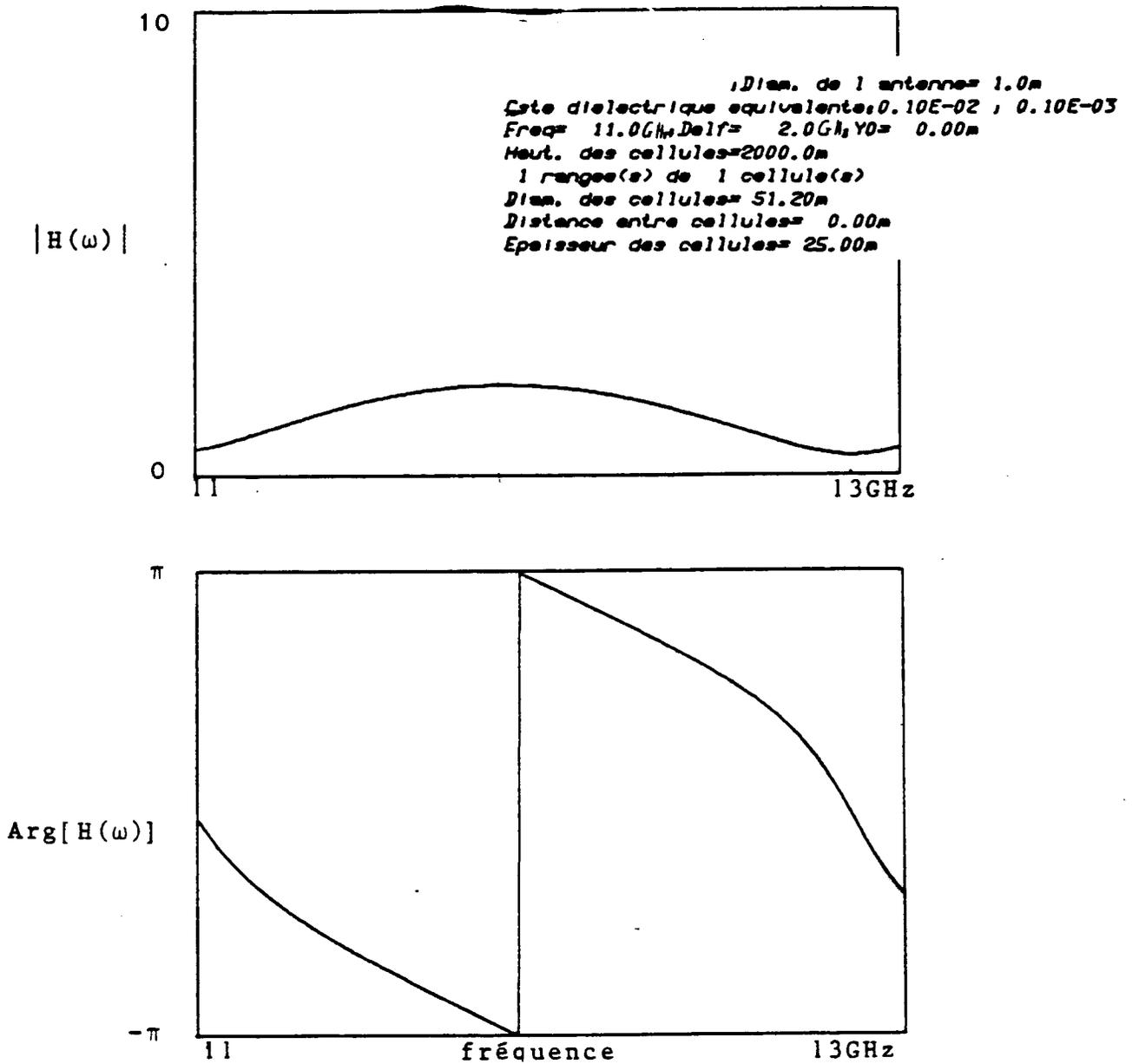


FIGURE 20 Exemple de distorsion dans la bande à partir d'un modèle déterministe de ciel nuageux.

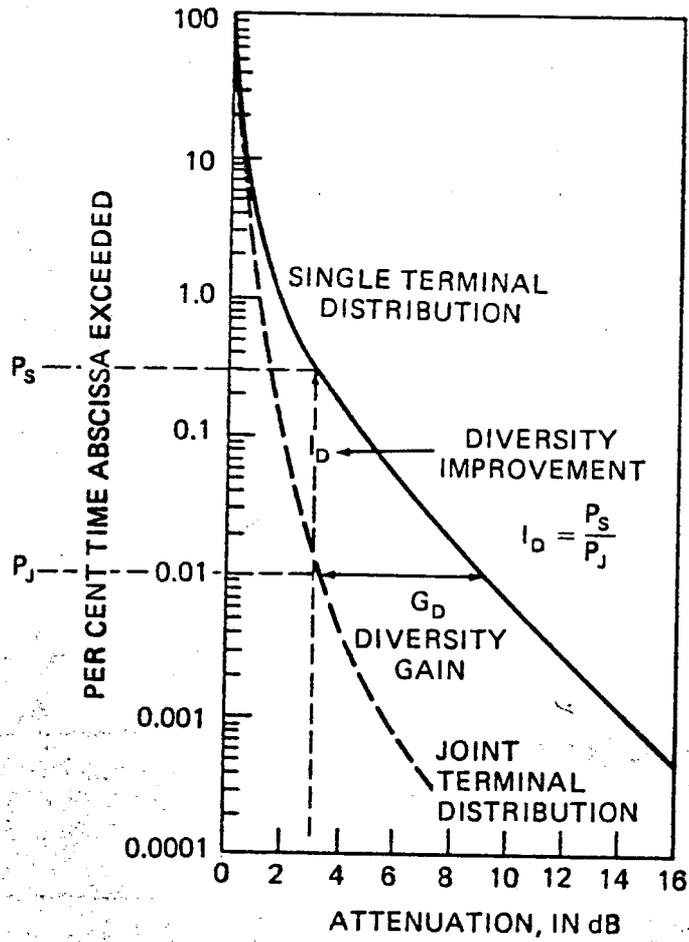


FIGURE 21 Définition du gain et de l'amélioration de diversité.

