

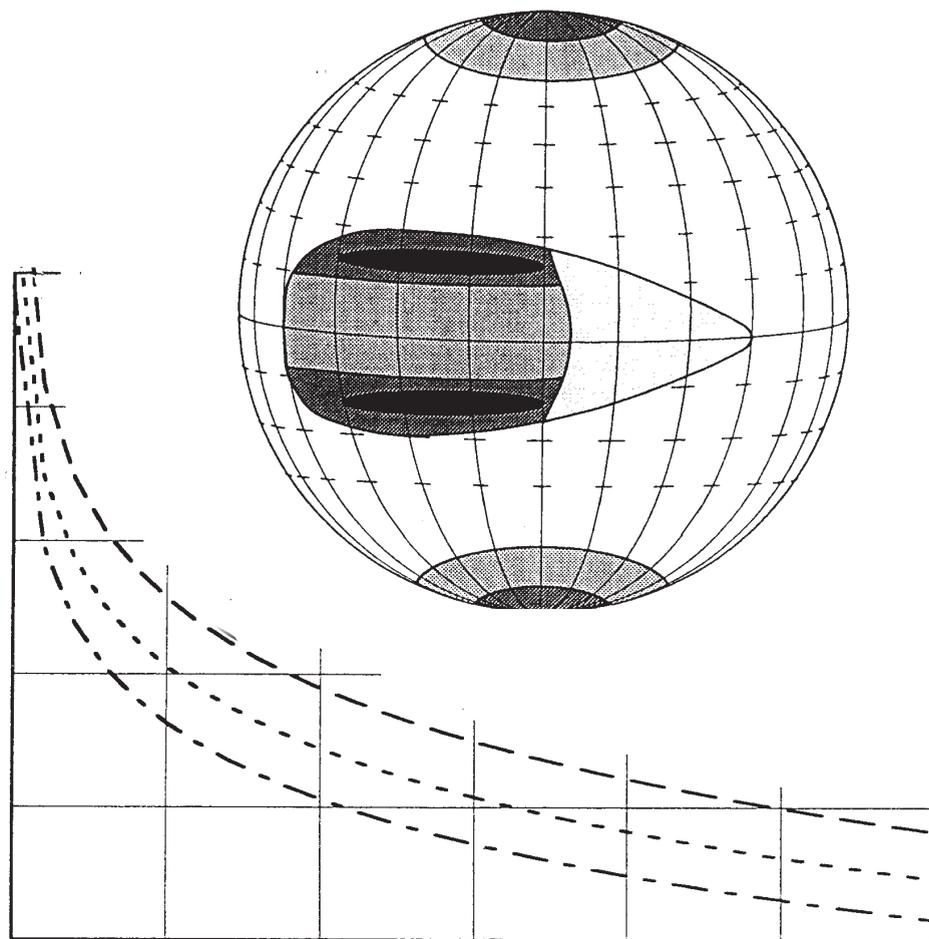


UNION INTERNATIONALE DES TÉLÉCOMMUNICATIONS

## MANUEL

# DONNÉES DE PROPAGATION DES ONDES RADIOÉLECTRIQUES POUR LA PRÉVISION DES COMMUNICATIONS SUR LES TRAJETS TERRE-ESPACE

MANUEL-PROPAGATION TERRE-ESPACE



Bureau des radiocommunications  
Genève, 1996



# **MANUEL**

## **DONNÉES DE PROPAGATION DES ONDES RADIOÉLECTRIQUES POUR LA PRÉVISION DES COMMUNICATIONS SUR LES TRAJETS TERRE-ESPACE**



## PRÉFACE

Le présent Manuel a été élaboré par des experts du Groupe de travail 3M (Propagation point à point et Terre-espace) de la Commission d'études 3 de l'UIT-R (Propagation des ondes radioélectriques), sous la présidence de M. M.P.M. Hall (Royaume-Uni).

Ont contribué à l'élaboration du Manuel:

- M. Jeremy Allnutt
- M. J.P.V. Poiars Baptista
- M. Asoka Dissanayake
- M. Glenn Feldhake
- Mme. Fatim Haidara
- M. Yoshio Karasawa
- Mme. Marlene Pontes
- M. David Rogers
- M. Erkki Salonen
- M. Haim Soicher
- Mme. Carol Wilson

Le Manuel a été édité par Mme Carol Wilson et M. David Rogers.

## TABLE DES MATIÈRES

	<b>Page</b>
<b>CHAPITRE 1 - INTRODUCTION</b> .....	1
1.1 Relation entre ce Manuel et les Recommandations de la Commission d'études 3 de l'UIT-R .....	1
1.2 Utilisation du Manuel sur les communications Terre-espace .....	2
<b>CHAPITRE 2 - EFFETS DE PROPAGATION DANS LA TROPOSPHÈRE ET L'IONOSPHERE</b> .....	5
<b>CHAPITRE 3 - AFFAIBLISSEMENT DE PROPAGATION</b> .....	6
3.1 Affaiblissement dû aux gaz atmosphériques .....	6
3.1.1 Méthode de calcul de l'affaiblissement dû aux gaz .....	6
3.2 Affaiblissement dû aux précipitations et aux nuages .....	6
3.2.1 Prévion des statistiques d'affaiblissement pour une année moyenne (calcul à partir de l'intensité de précipitation ponctuelle) .....	6
3.2.1.1 Fondements de la méthode de prévision de l'affaiblissement par la pluie .....	7
3.2.1.2 Longueur de la cellule de pluie équivalente .....	8
3.2.1.3 Hauteur équivalente de la cellule de pluie .....	8
3.2.1.4 Affaiblissement linéique .....	8
3.2.2 Similitude à long terme en fréquence et en polarisation des statistiques de l'affaiblissement dû à la pluie .....	9
3.2.3 Variations saisonnières - mois le plus défavorable .....	9
3.2.4 Discussion de l'évaluation des modèles (tests) .....	10
3.2.5 Exemple de calcul .....	10
3.2.6 Affaiblissement par les nuages .....	12
3.3 Diversité et caractéristiques spatiales de la pluie .....	13
3.3.1 Diversité d'emplacement .....	13
3.3.1.1 Distribution de référence .....	15
3.3.1.2 Facteur d'amélioration de la diversité .....	16
3.3.1.3 Gain de diversité .....	17
3.3.1.4 Gain de diversité instantané .....	17
3.3.1.5 Comparaison entre le facteur d'amélioration de la diversité et le gain de diversité en tant que paramètres de mesure .....	18

3.3.1.6	Exemples de calculs avec utilisation des méthodes recommandées pour la prévision en diversité d'emplacement .....	18
3.3.1.7	Facteurs influençant la performance de la diversité d'emplacement .....	21
3.3.2	Distribution statistique du niveau des signaux sur des zones étendues.....	27
3.3.3	Autres techniques de diversité.....	28
3.3.3.1	Diversité d'orbite .....	28
3.3.3.2	Diversité de fréquence.....	29
3.3.3.3	Diversité de temps .....	29
3.4	Caractéristiques des événements de précipitation .....	29
3.4.1	Durée des évanouissements individuels .....	31
3.4.2	Intervalles inter-évanouissements et intervalles inter-événements .....	34
3.4.3	Vitesses de variation de l'affaiblissement.....	36
3.4.4	Corrélation entre les valeurs instantanées de l'affaiblissement à différentes fréquences.....	37
3.5	Effets du sable et de la poussière .....	38
3.5.1	Généralités .....	38
3.5.2	Catégories des tempêtes de poussière.....	38
3.5.3	Modèles de prévision des dégradations dues aux phénomènes de propagation .....	41
3.5.4	Résultats types de prévisions des dégradations dues aux phénomènes de propagation .....	42
	Références pour le Chapitre 3.....	44
	<b>CHAPITRE 4 - INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE DE BRUIT DU CIEL.....</b>	<b>50</b>
4.1	Influence de la température de bruit de l'atmosphère sur les trajets Terre-espace ..	50
4.2	Bruit galactique et autres sources de bruit extraterrestres .....	50
4.3	Bruit à la surface de la Terre et bruits artificiels.....	51
4.4	Problèmes pris à titre d'exemple .....	51
	Références pour le Chapitre 4.....	52
	<b>CHAPITRE 5 - DÉPOLARISATION SUR LE TRAJET.....</b>	<b>53</b>
5.1	Introduction.....	53
5.1.1	Causes physiques de la dépolarisation .....	53

5.1.2	Importance de la dépolarisation du point de vue du fonctionnement des systèmes .....	53
5.1.3	Isolement et découplage de polarisation.....	54
5.1.4	États de polarisation.....	54
5.1.5	Orthogonalité et désadaptation de la polarisation .....	56
5.2	Relation entre dépolarisation et affaiblissement.....	57
5.2.1	Calcul des statistiques de XPD à long terme.....	58
5.2.1.1	Dépolarisation par la glace .....	58
5.2.1.2	Influence de la fréquence .....	58
5.2.1.3	Influence du pourcentage de temps .....	60
5.2.2	Influence de la configuration du trajet.....	61
5.2.3	Évaluations de la qualité des modèles .....	62
5.2.4	Statistiques conjointes de XPD et de l'affaiblissement.....	62
5.2.5	Similitude à long terme en fréquence et en polarisation .....	63
5.3	Influence des phénomènes physiques sur XPD et XPI.....	63
5.3.1	Rotation de Faraday dans l'ionosphère .....	63
5.3.2	Effets des précipitations.....	63
5.3.2.1	Affaiblissement différentiel.....	63
5.3.2.2	Phase différentielle .....	64
5.4	Données relatives à la compensation des polarisations croisées .....	64
5.5	Inclusion de XPD trajet dans XPI système .....	65
5.6	Exemple de calcul de XPD trajet.....	66
5.6.1	Application graduelle de la méthode.....	67
5.6.2	Exemple d'application système.....	69
	Références pour le Chapitre 5.....	72
	<b>CHAPITRE 6 - EFFETS PRODUITS DANS L'ATMOSPHERE CLAIRE.....</b>	<b>75</b>
6.1	Affaiblissement dû à la défocalisation et au manque de cohérence du front de l'onde .....	75
6.2	Effets de la scintillation et de la propagation par trajets multiples.....	75
6.2.1	Généralités .....	75
6.2.2	Fondements du modèle de scintillation .....	76
6.2.2.1	Variations saisonnières et journalières .....	76
6.2.2.2	Influence de la fréquence .....	78

6.2.2.3	Influence de l'angle d'élévation .....	78
6.2.2.4	Influence du diamètre d'ouverture de l'antenne.....	78
6.2.2.5	Fonction de densité de probabilité (FDP) des variations de niveau du signal.....	78
6.2.2.6	Influence de la polarisation .....	79
6.2.3	Précision et champ d'application de la méthode de prévision .....	79
6.2.3.1	Degré d'exactitude et applicabilité de la prévision de la fluctuation quadratique moyenne .....	79
6.2.3.2	Degré d'exactitude et applicabilité de la prévision de la fonction de densité de probabilité (FDP) .....	80
6.2.4	Variations du signal à des angles d'élévation inférieures à 5° environ .....	80
6.2.4.1	Modèle empirique.....	81
6.2.4.2	Caractéristiques de l'affaiblissement sous de petits angles .....	84
6.3	Retards de propagation .....	85
6.4	Angle d'arrivée.....	86
	Références pour le Chapitre 6.....	88
	<b>CHAPITRE 7 - PROPAGATION TRANSIONOPHÉRIQUE.....</b>	<b>90</b>
7.1	Introduction.....	90
7.2	Contenu électronique total (CET).....	90
7.3	Effets dus à l'ionisation ambiante .....	90
7.3.1	Rotation de Faraday .....	90
7.3.2	Temps de propagation de groupe.....	91
7.3.3	Dispersion.....	93
7.3.4	Décalage de fréquence par effet Doppler .....	93
7.3.5	Direction d'arrivée du rayon .....	93
7.3.6	Absorption .....	94
7.3.6.1	Absorption aurorale.....	94
7.3.6.2	Absorption dans la calotte polaire .....	94
7.4	Effets dus aux irrégularités de l'ionisation.....	95
7.4.1	Effets de scintillation .....	95
7.4.2	Influences géographiques, saisonnières et solaires .....	96
7.4.3	Modèles de scintillation.....	98
7.5	Conclusion .....	99

Références pour le Chapitre 7.....	101
<b>CHAPITRE 8 - RÉFLEXIONS AU SOL ET INFLUENCE DU MILIEU LOCAL (INTERESSÉ SPECIALEMENT LES SYSTEMES MOBILES À SATELLITES).....</b>	<b>103</b>
8.1 Introduction.....	103
8.2 Effets dus à la surface terrestre .....	103
8.2.1 Réflexion sur la surface de la Terre.....	104
8.2.1.1 Réflexion spéculaire sur la surface d'une Terre plane.....	104
8.2.1.2 Réflexion spéculaire sur la surface d'une Terre sphérique régulière.....	105
8.2.1.3 Facteur de divergence.....	106
8.2.1.4 Réflexion sur des surfaces irrégulières.....	107
8.2.1.5 Propagation par trajets multiples due à des réflexions.....	110
8.2.2 Évanouissements dus aux réflexions sur la surface de la mer.....	110
8.2.2.1 Généralités.....	110
8.2.2.2 Caractéristiques de la surface de la mer .....	110
8.2.2.3 Modèle de calcul des évanouissements .....	112
8.2.3 Effet d'écran et simulation .....	120
8.2.3.1 Effet d'écran dû aux arbres .....	120
8.2.3.2 Effet d'écran dû aux bâtiments .....	124
8.2.4 Évanouissements dans le service mobile aéronautique par satellite sous l'effet des réflexions au sol .....	127
8.2.5 Brouillage causé par les systèmes à satellites adjacents.....	127
8.2.5.1 Généralités.....	127
8.2.5.2 Hypothèses de base du modèle.....	128
8.2.5.3 Degré d'exactitude des prévisions .....	129
8.2.6 Problème traité à titre d'exemple .....	129
8.2.7 Résultats des mesures expérimentales.....	133
8.2.7.1 Mesures pour le service mobile maritime terrestre par satellite....	133
8.2.7.2 Mesures de l'influence de la propagation par trajets multiples après réflexion sur la surface de la mer .....	135
8.3 Influence du milieu local .....	137
8.3.1 Contribution de bruit du milieu local .....	137

8.3.2	Superstructure des navires/blocage .....	138
8.3.3	Mouvement des antennes mobiles .....	139
	Références pour le Chapitre 8.....	141
	<b>CHAPITRE 9 - MODÉLISATION DES EFFETS COMBINÉS.....</b>	<b>144</b>
9.1	Somme équiprobable .....	144
9.2	Convolution.....	145
9.3	Segmentation temporelle .....	145
9.4	Somme quadratique .....	146
9.5	Exemple .....	146
	Références pour le Chapitre 9.....	148



## CHAPITRE 1

### INTRODUCTION

#### 1.1 Relation entre ce Manuel et les Recommandations de la Commission d'études 3 de l'UIT-R

Le présent Manuel, intitulé "Données de propagation des ondes radioélectriques à utiliser pour l'établissement de prévisions relatives aux communications sur des trajets Terre-espace", propose une description générale des effets de la propagation des ondes radioélectriques, donne des informations complémentaires sur ces effets. Il sert de volume d'accompagnement et de guide aux Recommandations que la Commission d'études 3 (CE 3) du Secteur des radiocommunications de l'UIT (UIT-R) tient à jour pour faciliter la conception des systèmes de communication Terre-espace.

Ce Manuel, destiné à être utilisé conjointement avec les Recommandations publiées de la CE 3, aidera l'utilisateur à appliquer ces Recommandations. Il concerne les Recommandations présentant des méthodes de prévision des dégradations et contenant des avis techniques sur la propagation des ondes radioélectriques pour le service fixe par satellite (SFS), le service de radiodiffusion par satellite (SRS), le service mobile maritime par satellite (SMMS), le service mobile terrestre par satellite (SMTS) et le service mobile aéronautique par satellite (SMAS). Les versions des Recommandations correspondantes qui sont utilisées tout au long de ce Manuel sont les suivantes:

- UIT-R P.618-4: Données de propagation et méthodes de prévision nécessaires pour la conception de systèmes de télécommunication Terre-espace, Genève, 1996.
- UIT-R P.679-1: Données de propagation nécessaires pour la conception des systèmes de radiodiffusion par satellite, Genève, 1994.
- UIT-R P.680-1: Données de propagation nécessaires pour la conception de systèmes de télécommunication mobiles maritimes Terre-espace, Genève, 1994.
- UIT-R P.681-2: Données de propagation nécessaires pour la conception de systèmes de télécommunication mobiles terrestres, Terre-espace, Genève, 1996.
- UIT-R P.682-1: Données de propagation et méthodes de prévision nécessaires pour la conception de systèmes de télécommunication aéronautiques mobiles Terre-espace, Genève, 1994.
- UIT-R P.531-3: Effets ionosphériques qui influent sur les systèmes de radiocommunication comportant des engins spatiaux, Genève, 1994.

Le présent Manuel va de pair avec les Recommandations citées ci-dessus et reprend la même terminologie et le même système de notation. Des numéros d'équation sont mentionnés dans les Recommandations. On a évité autant que faire se peut de reproduire dans le Manuel les données de propagation figurant déjà dans les Recommandations. Les méthodes de prévision sont décrites dans

les Recommandations. Il est préférable, évidemment, d'utiliser la dernière version des Recommandations pour effectuer les calculs concernant les systèmes.

Pour appliquer comme il convient les Recommandations relatives aux systèmes de communication Terre-espace, on a besoin de données radiométéorologiques ou autres figurant dans d'autres Recommandations de l'UIT-R. On peut trouver par ailleurs beaucoup d'informations générales dans le Manuel de l'UIT-R sur la radiométéorologie. Les versions des autres Recommandations citées dans le présent Manuel sont les suivantes:

- UIT-R P.311-7: Acquisition, présentation et analyse des données dans les études relatives à la propagation troposphérique, Genève, 1994.
- UIT-R P.372-6: Bruit radioélectrique, Genève, 1994.
- UIT-R P.453-5: Indice de réfraction radioélectrique: formules et données de réfractivité, Genève, 1996.
- UIT-R P.526-4: Propagation par diffraction, Genève, 1996.
- UIT-R P.527-3: Caractéristiques électriques du sol, Genève, 1994.
- UIT-R P.530-6: Données de propagation et méthodes de prévision nécessaires pour la conception de faisceaux hertziens à visibilité directe de Terre, Genève, 1996.
- UIT-R P.581-2: Notion de mois le plus défavorable, Genève, 1994.
- UIT-R P.676-2: Affaiblissement par les gaz de l'atmosphère, Genève, 1996.
- UIT-R P.834-1: Effets de la réfraction troposphérique sur la propagation des ondes radioélectriques, Genève, 1994.
- UIT-R P.836: Concentration en vapeur d'eau à la surface de la Terre, Genève, 1994.
- UIT-R P.837-1: Caractéristiques des précipitations pour la modélisation de la propagation, Genève, 1994.
- UIT-R P.838: Modèle d'affaiblissement linéique dû à la pluie destiné aux méthodes de prévision, Genève, 1994.
- UIT-R P.839: Modèle d'altitude de pluie pour les méthodes de prévision, Genève, 1994.
- UIT-R P.840-1: Affaiblissement dû aux nuages et au brouillard, Genève, 1994.
- UIT-R P.841: Conversion des statistiques annuelles en statistiques pour le mois le plus défavorable, Genève, 1994.
- UIT-R P.1057: Modélisation de la propagation des ondes radioélectriques: distributions de probabilité, Genève, 1994.

## **1.2 Utilisation du Manuel sur les communications Terre-espace**

Des données de propagation précises sont nécessaires pour concevoir, mettre en oeuvre et exploiter la plupart des systèmes de télécommunication par satellite modernes. La façon dont les ondes radioélectriques se propagent dans l'ionosphère et la troposphère à proximité de la surface de la Terre ou par réflexion sur cette surface est un élément important pour les concepteurs de systèmes

de télécommunication qui entendent utiliser un milieu de propagation atmosphérique pour transmettre de l'énergie électromagnétique entre les antennes d'un système. Il faut évaluer et intégrer dans le bilan de liaison qui fait partie de la conception des systèmes les dégradations des signaux suffisamment fréquentes et suffisamment fortes pour influencer les objectifs de qualité de fonctionnement et de disponibilité. On doit donc mettre au point des méthodes qui permettront de prévoir avec une précision suffisante, pour les applications techniques, l'importance et la fréquence des dégradations dues aux phénomènes de propagation.

Le présent Manuel donne des informations générales sur les causes physiques des dégradations observées sur les trajets, les principes de base des méthodes de prévision décrites dans les Recommandations ainsi que d'autres informations jugées utiles pour les applications techniques, notamment des données et des modèles qui ne peuvent pas encore faire l'objet d'une Recommandation. Dans la mesure du possible, les méthodes de prévision sont évaluées par expérimentation des données de mesure des banques de données de la CE 3 et les résultats servent à indiquer la précision des méthodes de prévision et la variabilité des données de mesure.

Le Manuel traite des dégradations dues aux phénomènes de propagation que subissent les systèmes exploités au-dessus de 100 MHz, ce qui couvre toutes les fréquences actuellement attribuées aux systèmes à satellites.

La dégradation que subit un système de télécommunication Terre-espace en raison des phénomènes de propagation peut être plus ou moins importante selon la fréquence et la polarisation des ondes, la géométrie du trajet (par exemple angle d'élévation du trajet), les objectifs de qualité de fonctionnement du système, les marges de qualité de fonctionnement réalisables, les détails de la configuration du système (envisage-t-on une exploitation en double polarisation) et les caractéristiques ionosphériques et météorologiques locales. Par exemple, l'affaiblissement dû à la pluie est souvent la principale cause des dégradations observées sur un trajet aux fréquences supérieures à 10 GHz environ mais ce phénomène est négligeable pour un système à satellites du service mobile fonctionnant à 1,5 GHz. Inversement, les phénomènes de réflexion à la surface, d'effet d'écran et de blocage sont d'une importance primordiale pour un système mobile mais sont rarement déterminants pour une station du SFS car on peut prévoir d'implanter cette station sur un emplacement où les effets de ces phénomènes seront minimes.

Le Tableau 1.1 récapitule les différents phénomènes de propagation et les systèmes pour lesquels les conséquences de ces phénomènes sont très importantes.

Le présent Manuel relatif à la propagation sur les trajets Terre-espace ne traite que des effets de la propagation sur le signal utile, exception faite de la dépolarisation sur le trajet; ce dernier phénomène ne présente de l'intérêt que du point de vue des brouillages (par exemple entre émissions de signaux à polarisation orthogonale), mais il sera néanmoins étudié ici car on peut établir une relation statistique entre ce phénomène et les dégradations dues à la propagation du signal copolaire direct.

Dans un souci de conformité avec la présentation des Recommandations correspondantes, les données sont regroupées en fonction des paramètres des liaisons pris en compte dans la planification proprement dite des systèmes et non selon les phénomènes physiques et leurs effets.

TABLEAU 1.1

**Dégradations dues aux phénomènes de propagation que subissent les systèmes de télécommunication par satellite**

Dégradation	Causes physiques	Systèmes affectés	Fréquence	Section du Manuel
Affaiblissement du signal, augmentation du bruit du ciel	Gaz atmosphériques, nuages, précipitations	Tous les types de systèmes à satellites	$f >$ environ 10 GHz	3, 4
	Couches inférieures de l'ionosphère		$f <$ 70 MHz	7.3.6
Dépolarisation du signal	Gouttes de pluie, cristaux de glace	Systèmes à double polarisation	à 6/4, 14/11 et 30/20 GHz	5
	Rotation de Faraday		en dessous de 1 GHz environ	7.3.1
Scintillations du signal (phase et amplitude)	Variations du coïndice de réfraction, en particulier à de faibles angles d'élévation (en dessous de 10° environ)	Systèmes à faible marge de protection, poursuite d'antenne, commande de puissance sur la liaison montante	$f >$ environ 10 GHz	6.2
	Variations du coïndice de réfraction dans l'ionosphère		10 MHz - 12 GHz	7.4
Réfraction, propagation par trajets multiples dans l'atmosphère	Gaz atmosphériques	Systèmes fonctionnant à de faibles angles d'élévation; poursuite d'antenne	1 - 45 GHz	6
	Distribution des électrons dans l'ionosphère			7.3.5
Réflexion, propagation par trajets multiples, phénomène d'effet d'écran, de blocage	Objets, végétation à la surface de la Terre	Services mobiles par satellite		8
Temps de propagation et variations du temps de propagation	Espace libre, variations dans la troposphère	Systèmes AMRT et de localisation de positions; systèmes de commande adaptatifs en boucle fermée		6.3
	Contenu électronique total			7.3.2
Brouillage entre systèmes	Phénomènes de conduits, diffusion par les précipitations, diffraction	Tous les types de systèmes à satellites	Systèmes à 6/4 GHz	8.2.5, (SMS); voir également le Manuel sur les données de propagation des ondes radioélectriques à utiliser pour l'établissement de prévisions relatives aux niveaux du signal susceptibles de causer des brouillages et l'évaluation des distances de coordination (sera publié en 1998)
	Diffusion et réflexion ionosphériques		$f <$ 300 MHz	
Dispersion	Contenu électronique total	Systèmes à grande largeur de bande		7.3.3

## **CHAPITRE 2**

### **EFFETS DE PROPAGATION DANS LA TROPOSPHÈRE ET L'IONOSPHERE**

La Commission d'études 3 de l'UIT-R s'occupe des effets de propagation dans toutes les régions de l'atmosphère et dans l'espace libre, y compris l'ionosphère terrestre. La plupart des phénomènes météorologiques (précipitations) observés sur Terre prennent naissance dans la troposphère qui est la couche non ionisée de l'atmosphère voisine de la surface de la Terre, d'une épaisseur d'environ 15 km (au niveau de l'équateur). L'épaisseur de la troposphère décroît vers les pôles. Plus la fréquence augmente au-dessus de 1 GHz, plus les effets de propagation dans la troposphère sont importants. Pour les systèmes du service mobile par satellite, les effets de la réflexion à la surface de la Terre sont d'une importance primordiale à des fréquences encore moins élevées.

Aux fréquences inférieures à 1 GHz environ, la région la plus importante de l'atmosphère terrestre est l'ionosphère, la couche ionisée de l'atmosphère située au-dessus de la stratosphère, dans laquelle les effets de propagation à des fréquences peu élevées sont très prononcés. Les effets de propagation dans l'ionosphère sont examinés en détail dans le Manuel de l'UIT-R sur l'ionosphère et ses effets sur la propagation des ondes radioélectriques sur les trajets de Terre et Terre-espace dans les bandes d'ondes myriamétriques jusqu'aux bandes d'ondes centimétriques. Les effets importants pour les trajets Terre-espace sont quant à eux traités dans le Chapitre 7 du présent Manuel.

## CHAPITRE 3

### AFFAIBLISSEMENT DE PROPAGATION

#### 3.1 Affaiblissement dû aux gaz atmosphériques

Les gaz présents dans l'atmosphère peuvent affaiblir la propagation des ondes électromagnétiques. Cet affaiblissement, dû à l'absorption moléculaire des éléments constitutifs de l'atmosphère, dépend beaucoup de la fréquence. En dessous de 70 GHz, la vapeur d'eau et l'oxygène sont les principales causes de cet affaiblissement.

##### 3.1.1 Méthode de calcul de l'affaiblissement dû aux gaz

La procédure actuellement adoptée dans la Recommandation UIT-R P.618 pour le calcul de l'affaiblissement dû aux gaz atmosphériques est celle présentée, pour la configuration la plus simple, dans la Recommandation UIT-R P.676.

Les équations (1) à (3) de la Recommandation UIT-R P.618 reposent sur l'hypothèse que les densités de vapeur d'eau et d'oxygène décroissent de façon exponentielle, bien qu'à des rythmes différents. On peut utiliser cette approximation du premier ordre pour des emplacements situés à une altitude de moins de 1 000 m.

Dans cette procédure, il faut utiliser comme donnée d'entrée radiométéorologique la densité de la vapeur d'eau à la surface. Si l'on ne dispose pas de mesures locales de ce paramètre on peut utiliser la Recommandation UIT-R P.836.

Pour les emplacements situés à des altitudes de plus de 1 000 m ou caractérisés par un angle d'élévation du trajet oblique négatif, il convient d'utiliser les procédures plus complètes adoptées dans la Recommandation UIT-R P.676. On utilisera l'Annexe 1 de cette Recommandation si l'on veut avoir des estimations très précises de l'affaiblissement dû aux gaz. Dans ce cas, on a besoin de mesures des profils atmosphériques de pression, de température et d'humidité (profils de radiosondes).

#### 3.2 Affaiblissement dû aux précipitations et aux nuages

##### 3.2.1 Prévision des statistiques d'affaiblissement pour une année moyenne (calcul à partir de l'intensité de précipitation ponctuelle)

La distribution de l'intensité de pluie n'est pas homogène dans l'espace et dans le temps. Des enregistrements pluviométriques montrent que de courts intervalles de forte intensité de pluie apparaissent dans des périodes plus longues de pluies moins intenses. Les observations effectuées avec des radars météorologiques ont montré que de petites régions où l'intensité de pluie est forte apparaissent dans des zones plus grandes où la pluie est moins intense. Divers modèles de précipitation établis pour rendre compte de ces phénomènes complexes sont décrits dans le Manuel de l'UIT-R sur la radiométéorologie. Plusieurs méthodes ont été proposées pour prévoir les statistiques de l'affaiblissement dû à la pluie à partir de mesures d'intensité de précipitation effectuées à proximité du trajet. Elles diffèrent principalement par les modèles utilisés pour décrire la structure spatio-temporelle de l'intensité de précipitation. [Fedi, 1981a].

### 3.2.1.1 Fondements de la méthode de prévision de l'affaiblissement par la pluie

La méthode de prévision de l'affaiblissement par la pluie sur un trajet oblique, actuellement utilisée dans la Recommandation UIT-R P.618, repose sur l'évaluation de l'affaiblissement dépassé pendant 0,01% du temps ( $A_{0,01}$ ) à partir de l'intensité de précipitation dépassée pendant le même pourcentage ( $R_{0,01}$ ). La notion d'équiprobabilité ne concorde pas avec les données météorologiques et n'est pas entièrement satisfaisante d'un point de vue théorique mais la précision obtenue avec la méthode de prévision est compatible avec la qualité et la variabilité des données disponibles sur l'intensité de pluie.

Pour une valeur donnée de l'intensité de précipitation  $R_{0,01}$ , l'affaiblissement linéique ( $\gamma_R$ ) est calculé et multiplié par la longueur équivalente du trajet ( $L_{eff}$ ) pour donner la valeur correspondante de  $A_{0,01}$ . La longueur équivalente du trajet est le produit d'un facteur de réduction du trajet ( $r_{0,01}$ ) et de la longueur du trajet oblique  $L_S$ .

$$A_{0,01} = \gamma_R \cdot L_{eff} = \gamma_R \cdot L_S \cdot r_{0,01} \quad (3.1)$$

On utilise une formule empirique pour transposer l'affaiblissement à d'autres pourcentages de temps afin d'obtenir la distribution complète de l'affaiblissement par la pluie.

Les formules utilisées pour évaluer  $A_{0,01}$  reposent sur deux hypothèses:

- la structure spatiale de la pluie peut être modélisée par une cellule de pluie équivalente présentant une section rectangulaire, de longueur équivalente  $L_0$  et de hauteur équivalente  $h_R - h_S$  dans le plan du trajet (voir la Figure 3.1); et
- la cellule de pluie équivalente peut prendre n'importe quelle position par rapport au trajet avec la même probabilité.

L'expression du facteur de réduction du trajet  $r_{0,01}$  donnée par l'équation (8) de la Recommandation UIT-R P.618 résulte de ces deux hypothèses. La longueur équivalente du trajet représentée par le produit  $L_S r_{0,01}$  de l'équation (10) correspond à la longueur moyenne du trajet oblique ( $L_S$ ) à l'intérieur de la cellule de pluie équivalente en supposant une intensité de précipitation constante dans toute la cellule.

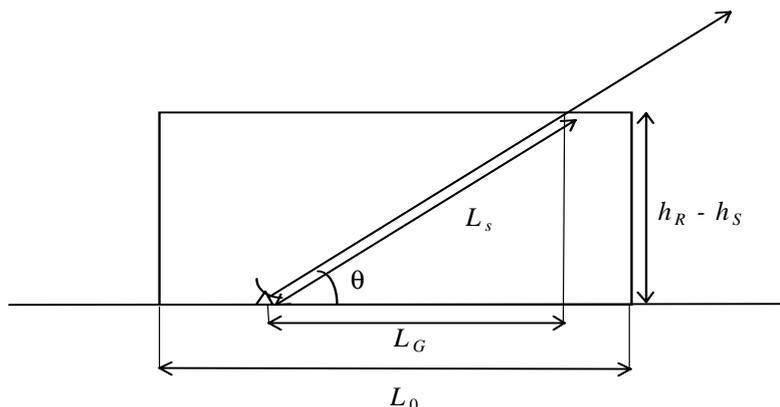


FIGURE 3.1

**Cellule de pluie équivalente pour une intensité de précipitation uniforme**

### 3.2.1.2 Longueur de la cellule de pluie équivalente

La notion de longueur équivalente du trajet actuellement utilisée dans la Recommandation UIT-R P.530 permet de prendre en considération le profil non uniforme de l'intensité de pluie le long d'un trajet horizontal pour la prévision de la distribution cumulative de l'affaiblissement dû à la pluie sur les liaisons de Terre. Elle correspond à la longueur d'un trajet fictif que l'on obtient à partir de données radioélectriques en divisant l'affaiblissement total par l'affaiblissement linéique dépassé pour le même pourcentage de temps.

L'expression du coefficient de réduction, qui établit une relation entre la longueur équivalente du trajet et la longueur réelle du trajet, supposé au départ dépendre uniquement de la longueur du trajet, a été par la suite améliorée car on a supposé que le coefficient dépendait aussi de l'intensité de pluie [Yamada et autres, 1987] dans la longueur équivalente de la cellule de pluie  $L_0$ .

La méthode adoptée dans la Recommandation UIT-R P.618 a été élaborée [Fedi, 1981b] par application du coefficient de réduction mis au point pour les liaisons de Terre à la partie du trajet Terre-espace soumise à la pluie. On calcule cette partie comme étant l'intersection du trajet avec l'altitude de l'isotherme 0°C, pour laquelle une expression préliminaire a été proposée sous la forme d'une fonction de la latitude. Dans la version actuelle, on a modifié la méthode en appliquant le même coefficient de réduction que celui adopté pour les liaisons de Terre [Yamada et autres, 1987] uniquement à la projection horizontale de la partie du trajet Terre-espace soumise à la pluie. On calcule cette partie comme étant l'intersection du trajet avec la hauteur équivalente de la cellule de pluie.

### 3.2.1.3 Hauteur équivalente de la cellule de pluie

On a proposé diverses techniques pour tenir compte de la structure verticale de la pluie [Brussaard, 1981]. Certaines d'entre elles sont des variantes de celles mises au point pour des trajets de Terre [Kalinin, 1976; Morita et Higuti, 1978; Misme et Waldteufel, 1980; Fedi 1980; Lin, 1980; Rue, 1985; García-López et autres, 1989]. D'autres reposent sur des études approfondies de la structure de la pluie [Crane, 1980; Fedi et Paraboni, 1986; Leitao et Watson 1986; Rue, 1988; Li et autres, 1987].

La méthode de prévision (Recommandation UIT-R P.618), dans sa version actuelle, tient compte de la structure verticale de la pluie en utilisant la hauteur équivalente de la cellule de pluie  $h_R$ , déduite de données expérimentales, dans l'expression de  $L_S$ . Pour des trajets verticaux, la longueur équivalente du trajet coïncide avec la hauteur équivalente de la cellule de pluie qui, à toute latitude, peut être différente de l'altitude de l'isotherme 0°C,  $h_{FR}$  comme indiqué dans la Recommandation UIT-R P.839. On ne dispose d'aucune information sur le comportement du rapport  $h_R/h_{FR}$  pour les différentes latitudes. Toutefois, des travaux récents de la Commission d'études 3 donnent à penser qu'il serait judicieux d'utiliser, dans le modèle,  $h_{FR}$  comme hauteur équivalente de la cellule de pluie.

### 3.2.1.4 Affaiblissement linéique

Pour les applications pratiques, on peut exprimer la relation entre l'affaiblissement linéique  $\gamma_R$  (dB/km) et l'intensité de pluie  $R$  (mm/h) en appliquant la loi en puissance [Olsen et autres, 1978] donnée dans l'équation (9) de la Recommandation UIT-R P.618. En prenant pour hypothèse que les gouttes de pluie sont sphériques, on a calculé les valeurs des paramètres  $k$  et  $\alpha$  pour un certain nombre de fréquences comprises entre 1 et 1 000 GHz, pour diverses valeurs de la température des gouttes et diverses distributions de leurs dimensions [Olsen et autres, 1978].

On a également calculé les valeurs de  $k$  et de  $\alpha$  pour la distribution de Laws et Parsons et une température des gouttes de 20°C en supposant que les gouttes ont la forme d'ellipsoïdes aplatis ayant un axe de révolution vertical et dont les dimensions ont un rapport avec celles de gouttes sphériques qui auraient le même volume [Fedi, 1979; Maggiori, 1981]. Les valeurs de  $k$  et de  $\alpha$  pour une polarisation horizontale et une polarisation verticale sont données dans le Tableau 1 de la Recommandation UIT-R P.838.

On peut obtenir par interpolation les valeurs de  $k$  et de  $\alpha$  à des fréquences autres que celles qui figurent dans le Tableau en utilisant une échelle logarithmique pour  $f$  et  $k$  et une échelle linéaire pour  $\alpha$ . Pour une polarisation rectiligne et une polarisation circulaire, la Recommandation UIT-R P.838 donne des formules approximatives permettant de déduire les valeurs de  $k$  et  $\alpha$  de celles obtenues pour une polarisation horizontale et pour une polarisation verticale.

D'autres mesures [Manabe et autres, 1987; Zakharyan et autres, 1989] donnent à penser que, au-dessus de 40 GHz environ, les valeurs de  $k$  sont peut-être sous-estimées et celles de  $\alpha$  surestimées dans le Tableau 1 de la Recommandation UIT-R P.838, ce qui pourrait s'expliquer par le fait que la distribution de Laws et Parsons pour les dimensions des gouttes n'est pas celle qui convient aux fréquences supérieures à 40 GHz environ.

La relation entre l'affaiblissement linéique et l'intensité de pluie est examinée plus en détail dans le Manuel de l'UIT-R sur la radiométéorologie.

### **3.2.2 Similitude à long terme en fréquence et en polarisation des statistiques de l'affaiblissement dû à la pluie**

On peut utiliser la méthode présentée au § 2.2.1 de la Recommandation UIT-R P.618 pour étudier quelle est la dépendance des statistiques de l'affaiblissement à l'égard de l'angle d'élévation, de la polarisation et de la fréquence; elle constitue donc un instrument utile pour l'extrapolation de l'affaiblissement en fonction de ces paramètres.

Si l'on ne dispose que de données d'affaiblissement mesurées sur une seule fréquence, la formule empirique (14) de la Recommandation UIT-R P.618, qui exprime le rapport d'affaiblissement directement sous forme d'une relation fonctionnelle entre la fréquence et l'affaiblissement, permettra de procéder par similitude en fréquence sur le même trajet et dans une gamme de fréquences allant de 7 à 50 GHz. On a observé que cette formule était celle qui correspondait le mieux d'un point de vue analytique aux données disponibles [Boithias, 1989]. La précision de cette méthode étant située dans une fourchette de 10%, il semble préférable d'utiliser chaque fois que cela est possible la méthode par similitude en fréquence plutôt qu'une méthode de prévision reposant sur les statistiques de précipitations.

La méthode par similitude en fréquence est examinée plus en détail dans le Manuel de l'UIT-R sur la radiométéorologie qui propose une autre méthode reposant sur l'utilisation des constantes  $k$  et  $\alpha$ , plus indiquée donc lorsqu'il faut procéder par similitude en polarisation. Dans d'autres méthodes encore, on peut mesurer les valeurs de l'affaiblissement sur deux fréquences ou se fonder sur l'angle d'élévation pour prévoir l'affaiblissement sur une autre fréquence.

### **3.2.3 Variations saisonnières - mois le plus défavorable**

La planification des systèmes exige souvent de connaître la valeur de l'affaiblissement dépassée pendant un pourcentage de temps  $P_W$  du "mois le plus défavorable" (voir la Recommandation UIT-R P.581). La conversion des statistiques annuelles en statistiques pour le

"mois le plus défavorable" est examinée en détail dans le Manuel de l'UIT-R sur la radiométéorologie. La relation entre  $P_W$  et le pourcentage de temps annuel  $P$  est donnée par la formule:

$$P = Q_1^{\frac{-1}{1-\beta}} P_W^{\frac{1}{1-\beta}} \quad (3.2)$$

Cette formule est valable pour des pourcentages de temps  $P$  compris entre 0,001% et 3%. Les valeurs de  $Q_1$  et  $\beta$  mesurées dans divers emplacements et pour plusieurs effets de propagation sont données dans le Manuel de l'UIT-R sur la radiométéorologie. Pour les besoins généraux de la planification, il est peut-être préférable d'utiliser une seule et même relation "moyenne" avec  $Q_1 = 2,85$  et  $\beta = 0,13$ , ce qui donne:

$$P = 0,3 P_W^{1,15} \quad (3.3)$$

pour  $1,9 \times 10^{-4} < P_W \% < 7,8$ .

Les mesures obtenues sous des climats variés indiquent que le rapport du pourcentage de temps annuel moyen du mois le plus défavorable au pourcentage de temps annuel moyen dépend dans une certaine mesure du climat. L'équation ci-dessus correspond à des climats caractérisés par des variations saisonnières d'intensité de pluie relativement faibles. Les valeurs de  $\beta$  et  $Q_1$  pour plusieurs régions du monde sont données dans le Tableau 1 de la Recommandation UIT-R P.841.

### 3.2.4 Discussion de l'évaluation des modèles (tests)

La Recommandation UIT-R P.311 définit des critères d'essai pour la comparaison de méthodes de prévision, ainsi qu'une variable d'essai pour la comparaison de prévisions de l'affaiblissement par la pluie. Des essais approfondis effectués avec les méthodes et les données disponibles donnent à penser que la méthode présentée au § 2.2.1 de la Recommandation UIT-R P.618 permet d'obtenir une précision efficace d'environ 35-40% à l'échelle de la planète. Il faut disposer d'autres données statistiques à long terme, en particulier sur les régions tropicales, pour améliorer la méthode de prévision.

### 3.2.5 Exemple de calcul

Pour une liaison par satellite depuis un emplacement donné, on a besoin des paramètres suivants:

Emplacement: (Rio de Janeiro)

Latitude: 22° 54' 10" S  
Longitude: 43° 12' 28" O  
 $h_s = 30$  m (hauteur de la station terrienne au-dessus du niveau moyen de la mer)

Satellite: (fictif)

Longitude: 53° O  
Fréquence: 12 GHz  
Polarisation: verticale

Angle d'élévation du trajet,  $\theta = 60,905^\circ$

Données relatives à la pluie:  $R_{0,01} = 70,4$  mm/heure (intensité de précipitation ponctuelle pendant 0,01% du temps d'une année moyenne)

Cette valeur correspond à l'intensité de précipitation dépassée pendant 0,01% d'une année et obtenue à partir de mesures faites sur l'emplacement; elle représente la moyenne des valeurs pour chaque année de mesure. Pour des emplacements pour lesquels on ne dispose pas de cette valeur, on peut l'obtenir à partir du Tableau 1 de la Recommandation UIT-R P.837. On obtient la zone hydrométéorologique à choisir dans le Tableau à partir des Figures 1 à 3 de la Recommandation UIT-R P.837.

Une fois que l'on dispose des paramètres requis, il est assez simple d'appliquer étape après étape la méthode de prévision de l'affaiblissement exposée au § 2.2.1.1 de la Recommandation UIT-R P.618:

*Étape 1:* La hauteur de pluie équivalente  $h_R$ , pour une latitude  $\phi$  de la station est:

$$h_R \text{ (km)} = 3,0 + 0,028\phi = 3,64 \text{ km}$$

*Étape 2:* La longueur du trajet oblique,  $L_S$ , est:

$$L_S = \frac{(h_R - h_s)}{\sin\theta} = 4,13 \text{ km}$$

*Étape 3:* La projection horizontale,  $L_G$ , est:

$$L_G = L_S \cos\theta = 2,0 \text{ km}$$

*Étape 4:* L'intensité de précipitation,  $R_{0,01}$ , dépassée pendant 0,01% d'une année moyenne est de 70,4 mm/h

*Étape 5:*  $L_0$  est:

$$35 \exp(-0,015R_{0,01}) = 12,17$$

Le facteur de réduction  $r_{0,01}$ , pendant 0,01% du temps, est donné par:

$$r_{0,01} = \frac{1}{1 + \frac{L_G}{L_0}} = 0,858$$

*Étape 6:* L'affaiblissement linéique  $\gamma_R$ , en utilisant les coefficients dépendant de la fréquence donnés dans la Recommandation UIT-R P.838 et l'intensité de précipitation,  $R_{0,01}$ , est:

$$\gamma_R = k(R_{0,01})^\alpha = 2,769$$

*Étape 7:* L'affaiblissement prévu dépassé pendant 0,01% d'une année moyenne est:

$$A_{0,01} = \gamma_R L_S r_{0,01} = 9,8 \text{ dB}$$

*Étape 8:* L'affaiblissement estimé qui sera dépassé pour d'autres pourcentages d'une année moyenne, dans une fourchette de 0,001% à 1% est:

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

La distribution cumulative est illustrée à la Figure 3.2.

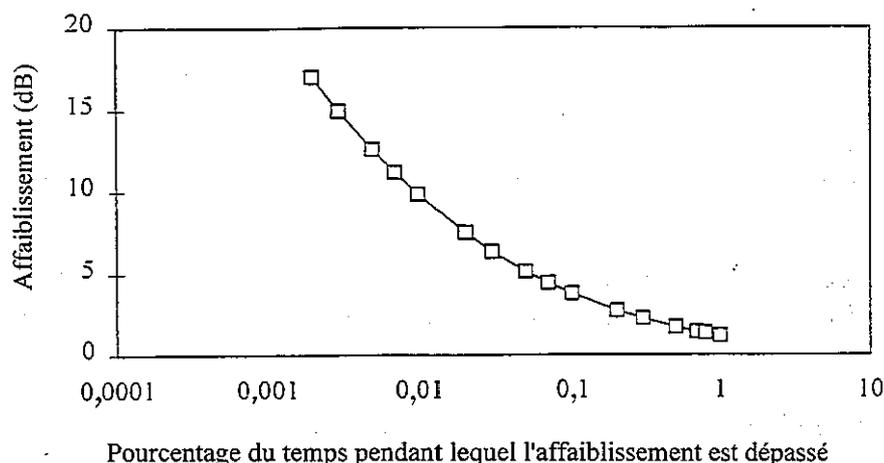


FIGURE 3.2

### Exemple de statistiques d'affaiblissement dû à la pluie

#### 3.2.6 Affaiblissement par les nuages

La formation de nuages peut être due à des phénomènes atmosphériques très divers qui conduisent à la formation de couches de nuages à différentes altitudes. Le Bureau météorologique mondial (BMM) définit neuf types de nuages différents pour chacune des trois hauteurs de nuages: inférieure, moyenne, supérieure. A partir d'observations basées sur les classifications du BMM on a établi des cartes de la couverture nuageuse [Warren et autres, 1986] qui font apparaître que des nuages d'un type ou d'un autre sont présents en moyenne pendant 53% du temps au-dessus des terres. Toute liaison entre un satellite et une station terrienne au sol, sur laquelle transitent les communications pendant un laps de temps important, devra donc être conçue de façon à pouvoir fonctionner à travers les nuages.

L'affaiblissement dû aux nuages observé sur les liaisons hertziennes Terre-espace n'est pas en principe un facteur important pour les services caractérisés par une grande disponibilité (temps de fonctionnement de la liaison de 99,96% pendant une année moyenne; temps d'interruption de 0,2% pendant un mois le plus défavorable moyen pour une liaison unidirectionnelle). La marge supplémentaire requise pour tenir compte de l'affaiblissement par les nuages, comparée à celle nécessaire pour remédier aux effets de l'affaiblissement par la pluie, est relativement faible. Par ailleurs, si le système utilisé a une faible marge de protection contre les évanouissements, l'affaiblissement dû aux nuages pourrait être important aux fréquences supérieures à 10 GHz environ.

Aux fréquences voisines de 11 GHz, de gros cumulus, par exemple, peuvent engendrer un affaiblissement de plus de 2 dB sur des trajets dont l'angle d'élévation est inférieur à 5°. Les cartes de la couverture nuageuse indiquent [Warren et autres, 1986] que des cumulus sont présents en moyenne pendant 5% du temps, au-dessus des terres, ce qui représente une proportion importante du temps quelles que soient les exigences de service. Lorsque les nuages se chargent en eau, la probabilité de précipitations augmente tout comme le risque d'observer sur la liaison un affaiblissement important. A de très faibles angles d'élévation, la scintillation troposphérique jouera très probablement un plus grand rôle que l'affaiblissement dû aux nuages.

La Recommandation UIT-R P.840 donne un modèle de prévision de l'affaiblissement par les nuages et par le brouillard qui peut être intéressant au-dessus de 100 GHz environ. Ce modèle repose sur le mécanisme physique de diffusion de Rayleigh par les gouttelettes et exige que soit connu le contenu en eau liquide des nuages.

### **3.3 Diversité et caractéristiques spatiales de la pluie**

Le relief a une grande influence sur les conditions météorologiques locales. Les variations à petite échelle de ces conditions peuvent se traduire par des différences importantes dans les intensités de précipitation d'un endroit à l'autre. Les différences à petite échelle des régimes pluviométriques peuvent se traduire par des différences d'affaiblissement sur les trajets en fonction du lieu (d'emplacement à emplacement) ou de la direction d'observation (d'azimut à azimut sur le même emplacement).

Il n'est pas rare d'observer des zones d'ombre pluviométrique ou zones à précipitations renforcées qui sont géographiquement proches les unes des autres (distance de moins de 30 km). C'est ce qui s'est produit pendant la campagne expérimentale ATS-6 en Europe alors que le satellite était positionné à 35° Est de longitude [Allnut et Shutie, 1977]. On peut tirer parti des différences importantes dans les statistiques cumulatives d'intensité de précipitation d'un emplacement à un autre sur une zone de petite étendue pour choisir l'emplacement convenant le mieux à une station terrienne. La préférence est en principe donnée à l'emplacement où les statistiques d'intensité de précipitation sont les plus faibles.

Si la liaison vers le satellite doit traverser une région où les précipitations sont très élevées, les avantages liés au choix d'un emplacement optimal seront en partie neutralisés. C'est ce que l'on a observé lors d'une expérience faite dans le cadre des campagnes SIRIO et OTS [Rucker, 1980]. Du fait de la présence d'une chaîne de collines hautes d'environ 200 m, à peu près parallèle à l'azimut du satellite SIRIO, les précipitations ont été beaucoup plus fortes sur ce trajet que sur le trajet du satellite OTS qui dans sa plus grande partie surplombait une vallée.

Les différences temporelles des intensités de précipitation sur de petites distances sont toutefois beaucoup plus importantes pour les services à grande disponibilité. On peut tirer parti de ce fait pour réduire l'affaiblissement net observé le long d'un trajet oblique lorsqu'on utilise simultanément plusieurs emplacements. C'est la technique dite de diversité d'emplacement ou de diversité de trajet [Hogg, 1967].

#### **3.3.1 Diversité d'emplacement**

Pour des systèmes de télécommunication, par diversité de trajet on entend la mise à disposition de trajets de propagation de remplacement pour la transmission des signaux, avec possibilité de choisir le trajet le moins perturbé lorsque les conditions le justifient. Pour les systèmes de télécommunication par satellite, la mise en oeuvre de la diversité de trajet suppose l'implantation sur des emplacements distincts de plusieurs stations terriennes interconnectées, d'où le terme "diversité d'emplacement". Un schéma est donné à la Figure 3.3.

Des mesures [Wilson et Mammel, 1973; Witternigg et autres, 1993] et des analyses [Hodge, 1974] font apparaître que la disponibilité supplémentaire que permet d'obtenir l'exploitation simultanée de plusieurs stations est faible. Par ailleurs, la mise en oeuvre de stations de diversité supplémentaires destinées à être exploitées avec une station principale serait complexe et onéreuse. Récemment toutefois, on a cherché à obtenir une disponibilité relativement élevée (supérieure à 99,9%) pour les microstations (VSAT) exploitées dans la bande des 14/11 GHz ou des 30/20 GHz en faisant

fonctionner plusieurs microstations interconnectées via un réseau de zone urbaine (MAN) utilisant un gestionnaire de réseau à diversité sur zones étendues (WAD) [Allnutt, 1993]. Chaque microstation jouerait le rôle d'une ressource transparente pour tout utilisateur connecté au réseau de zone urbaine et serait activée via le gestionnaire WAD selon la situation météorologique et/ou la situation de trafic. On envisage de procéder à des expériences dans les bandes des 14/11 GHz et 30/20 GHz pour déterminer s'il est possible de mettre en oeuvre les techniques WAD pour microstations sur des réseaux de zone urbaine.

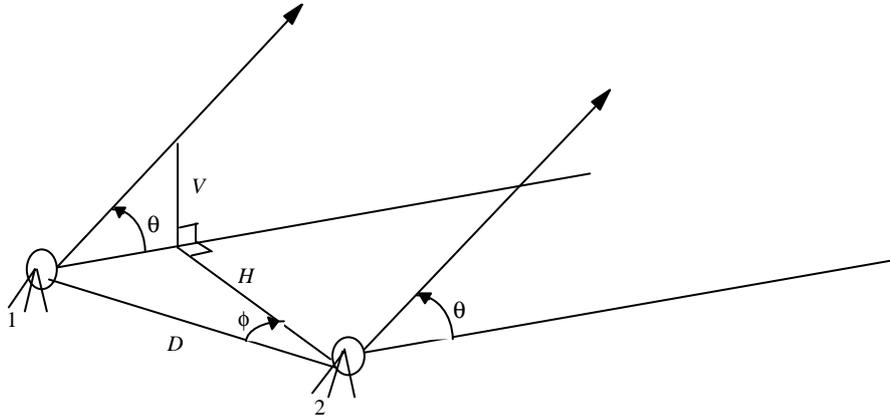


FIGURE 3.3

**Configuration de diversité à deux emplacements**  
 **$H$  et  $V$  sont respectivement les distances dans le plan horizontal**  
**et dans le plan vertical entre les trajets**

D'un point de vue météorologique toutefois, les expériences de diversité à plusieurs emplacements (trois ou plus de trois stations) apporteront peu de données supplémentaires si, en raison des caractéristiques orographiques, une telle configuration ne s'impose pas. Les recherches ont donc été axées sur des configurations de diversité à deux emplacements dans le cas de communications par satellite.

Plusieurs facteurs peuvent influencer sur la qualité de fonctionnement d'une installation de diversité à deux emplacements donnée. Ces facteurs sont les suivants:

- la distance entre les stations,  $d$ ;
- la géométrie du trajet (angle d'élévation  $\theta$  et angle d'azimut  $\phi$ );
- les caractéristiques météorologiques locales (statistiques d'intensité de précipitation, degré de convectivité, dimensions et formes des cellules de pluie, espacement relatif entre les cellules, etc.);
- la fréquence,  $f$ ;
- l'orientation de la ligne de base reliant les emplacements; et
- les caractéristiques topographiques locales.

Il existe des relations entre ces différents paramètres (voir la Figure 3.4), de sorte qu'il est difficile de faire dépendre la diversité de l'un quelconque de ces paramètres à l'exclusion des autres. On se reportera à ce sujet au § 3.3.1.7.

La présentation de statistiques conjointes d'affaiblissement sur le trajet et le calcul du gain de diversité dépendent jusqu'à un certain point de la distribution de référence choisie.

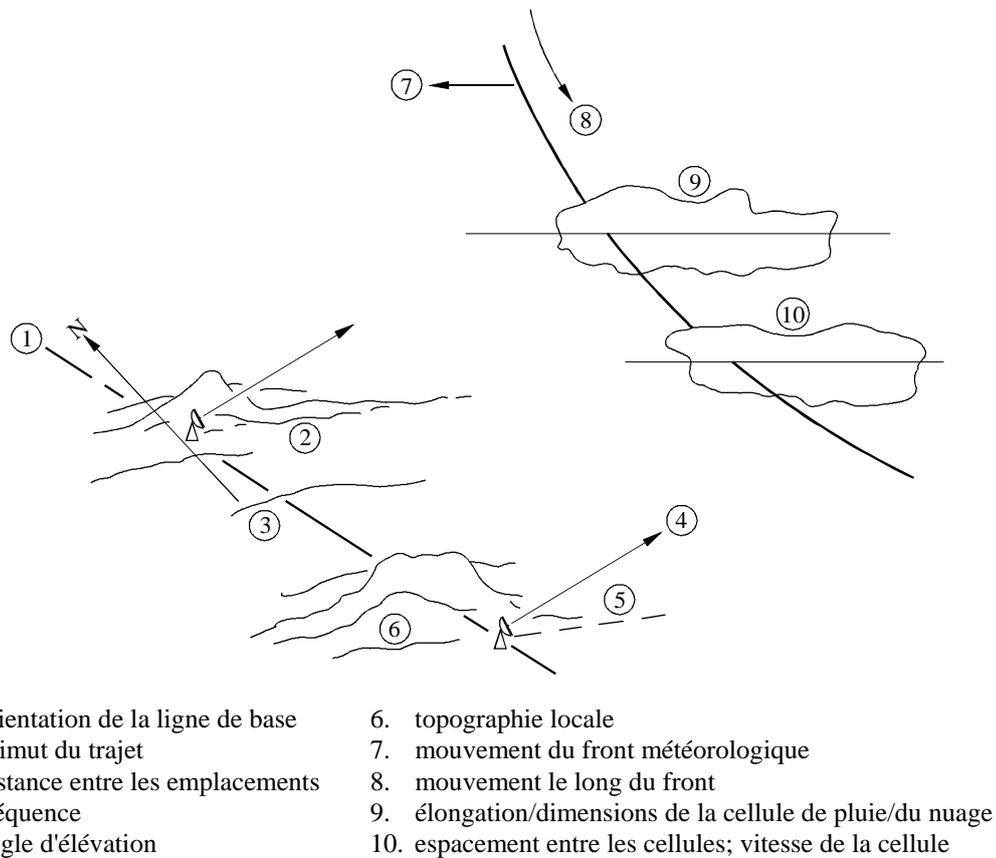


FIGURE 3.4

### Facteurs influant sur la performance de diversité

#### 3.3.1.1 Distribution de référence

En théorie, si l'on pouvait toujours déterminer et choisir pour acheminer les communications le trajet le moins perturbé d'une configuration de diversité, la distribution cumulative définie pour chaque pourcentage de temps par la plus petite valeur d'affaiblissement (*A* ou *B*; Figure 3.5) constituerait une distribution de référence plus raisonnable que la distribution moyenne pour un seul emplacement. La performance de diversité serait alors moins bonne que celle calculée à partir de l'affaiblissement moyen sur un trajet unique, d'où un apparent paradoxe: pourquoi une commutation parfaite entre des trajets de diversité ne maximise-t-elle pas la performance de diversité disponible?

Une telle commutation maximise en fait la performance de diversité mais les résultats sont reflétés dans la distribution (conjointe) de diversité de la Figure 3.5. L'hypothèse d'une commutation parfaite est implicite dans les données disponibles, qui sont traitées par sélection du plus faible affaiblissement sur le trajet pour chaque intervalle d'échantillonnage afin de calculer la distribution conjointe d'affaiblissement. La diversité par commutation permettrait elle aussi d'atteindre l'objectif d'une "commutation parfaite" étant donné que le plus fort des deux signaux servirait toujours de signal de référence. Pour des signaux analogiques, il faut une commande de phase très précise pour réaliser une diversité par commutation, qui a donc tendance à être limitée aux applications à bande relativement étroite.

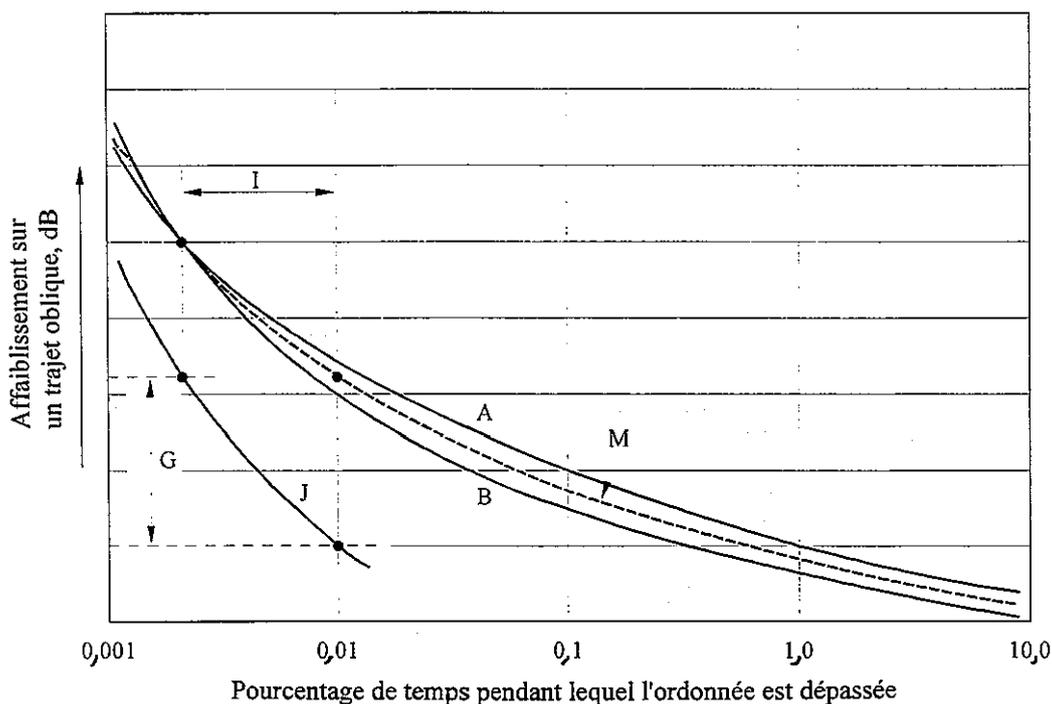


FIGURE 3.5

### Illustration des paramètres de diversité

Dans les systèmes en exploitation, la commutation s'effectuera selon un algorithme conçu pour réduire au minimum le nombre de commutateurs et la probabilité résultante d'interruption d'une liaison temporaire tout en maintenant une qualité de service acceptable [Wallace et Carr, 1982]. On évitera donc en principe la commutation, même si la liaison principale est perturbée, à condition que le trajet dispose d'une marge de réserve raisonnable. Quoi qu'il en soit, les erreurs de mesure inhérentes à l'équipement de contrôle fausseront inévitablement la détermination du trajet le moins perturbé et donc l'efficacité de commutation. La distribution conjointe de l'affaiblissement que l'on pourrait obtenir avec une commutation parfaite ne sera pas réalisée dans ces conditions. La mesure dans laquelle elle pourra être réalisée dépend de la stratégie de commutation et de la précision de mesure de l'équipement.

Compte tenu de ce qui précède, les détails de la distribution de référence demandent à être précisés pour de nombreuses applications. Dans la pratique, l'affaiblissement moyen pour un emplacement unique est une référence commode qui, semble-t-il, lisse certaines des erreurs expérimentales ainsi que les variations d'année en année des statistiques mesurées pour les différents trajets.

Il existe deux méthodes statistiques normalisées établissant une relation entre la distribution moyenne de l'affaiblissement sur un emplacement unique et la distribution de l'affaiblissement en diversité (voir la Figure 3.5): le facteur d'amélioration de la diversité et le gain de diversité.

#### 3.3.1.2 Facteur d'amélioration de la diversité

La Figure 3.5 illustre un exemple fictif mais représentatif de distributions cumulatives de l'affaiblissement dû à la pluie à 11 GHz pour deux trajets uniques (A et B), et pour la distribution (conjointe) de diversité (J) déduite des enregistrements des évanouissements sur les trajets A et B en choisissant le plus petit affaiblissement pour chaque échantillon de données.

La moyenne (pondérée) des deux valeurs de l'affaiblissement dû à la pluie pour chaque pourcentage de temps définit la distribution moyenne de l'affaiblissement pour un emplacement unique (courbe en pointillés de la Figure 3.5) qui sert habituellement de distribution de référence pour caractériser la performance de diversité.

Le facteur d'amélioration de la diversité [Wilson et Mammel, 1973] (ou avantage de diversité [Hodge, 1974]),  $I$ , est défini comme étant le rapport entre le pourcentage de temps pour un trajet unique  $p_m$  et le pourcentage de temps en diversité  $p_{div}$  pour une valeur donnée,  $A$ , de l'affaiblissement dû à la pluie:

$$I(A) = \frac{p_m(A)}{p_{div}(A)} \quad (3.4)$$

Un modèle du facteur d'amélioration de la diversité  $I$ , est décrit au § 2.2.4.1 de la Recommandation UIT-R P.618.

### 3.3.1.3 Gain de diversité

Le gain de diversité,  $G$ , qui diffère de l'avantage de diversité, est défini [Altman et Sichak, 1956; Hodge, 1973] comme étant la différence (en dB) entre les valeurs de l'affaiblissement dû à la pluie respectivement pour un seul emplacement et en diversité, pour un pourcentage de temps  $p$  donné (voir la Figure 3.5):

$$G(p) = A_m(p) - A_{div}(p) \quad (3.5)$$

Il est possible d'évaluer le gain de diversité pour une configuration de diversité à deux emplacements donnée en appliquant le modèle indiqué au § 2.2.4.2 de la Recommandation UIT-R P.618.

### 3.3.1.4 Gain de diversité instantané

On a proposé une autre grandeur mathématique "le gain de diversité instantané" [Towner et autres, 1984] pour caractériser la performance de diversité. Pour une configuration de diversité à  $N$  emplacements, le gain de diversité instantané au temps  $t$  est donné par la formule suivante:

$$G_i(t) = A_{max}(t) - A_{min}(t) \quad (3.6)$$

où  $A_{max}(t)$  et  $A_{min}(t)$  sont respectivement les valeurs maximale et minimale des  $N$  affaiblissements sur trajet unique au temps  $t$ . Pour une configuration de diversité à deux emplacements,  $G_i(t)$  est simplement la différence positive entre les deux affaiblissements de trajet à un instant quelconque.

Le gain de diversité n'apporte aucune information instantanée mais fournit les données statistiques de base nécessaires pour concevoir un système de diversité. Lorsqu'on traite les données sur la base du gain de diversité instantané, on perd les données de base nécessaires pour la conception des systèmes (disponibilité (statistique) supplémentaire ou marge de protection contre les évanouissements apportée par la diversité) mais pas la différence instantanée entre les affaiblissements.

### 3.3.1.5 Comparaison entre le facteur d'amélioration de la diversité et le gain de diversité en tant que paramètres de mesure

Un avantage du facteur d'amélioration de la diversité tient au fait qu'il peut être déterminé pour de petits intervalles de temps de la distribution de diversité. Par contre, il ne peut pas être évalué pour des affaiblissements importants sur un emplacement unique. Pour le gain de diversité, c'est exactement l'inverse.

Le gain de diversité et le facteur d'amélioration de la diversité sont tous les deux définis par les mêmes distributions cumulatives et sont d'une certaine façon équivalents mais, comme cela a été noté [Hodge, 1974], l'affaiblissement sur un trajet unique et l'affaiblissement en diversité utilisés pour calculer l'amélioration de diversité correspondent à des pourcentages de temps différents et donc à des fiabilités statistiques différentes. En particulier, les affaiblissements pour les petits pourcentages de temps de la distribution de diversité peuvent être entachés d'importantes erreurs statistiques, qui se répercuteront sur le facteur d'amélioration de la diversité. Les facteurs d'amélioration de la diversité déterminés expérimentalement [Allnutt, 1978; Lin et autres, 1980] ont en fait un comportement plutôt irrégulier et erratique alors que le gain de diversité présente en principe des caractéristiques plus ou moins prévisibles [Allnutt, 1978; Hodge, 1976]. Il apparaît donc que le gain de diversité est le paramètre qui convient le mieux pour caractériser la performance de diversité.

### 3.3.1.6 Exemples de calculs avec utilisation des méthodes recommandées pour la prévision en diversité d'emplacement

#### 3.3.1.6.1 Facteur d'amélioration dû à la diversité

Dans la Recommandation UIT-R P.618, le facteur d'amélioration dû à la diversité,  $I$ , est donné par l'équation (16) où  $p_1$  et  $p_2$  sont respectivement le pourcentage de temps pour un emplacement unique et le pourcentage de temps en diversité, et  $\beta$  est un paramètre qui dépend des caractéristiques de la liaison. On peut utiliser l'approximation

$$I \approx \left[ 1 + \frac{100\beta^2}{p_1} \right] \quad (3.7)$$

découlant de l'équation (16) de la Recommandation UIT-R P.618 dans la quasi-totalité des cas car la valeur de  $\beta$  est en général faible.

Il ressort de nombreuses mesures effectuées dans la bande des 10-20 GHz, et principalement entre 11 et 13,6 GHz, que la valeur de  $\beta^2$  dépend essentiellement de la distance  $d$  (km) entre les stations terriennes, et très peu de l'angle d'élévation et de la fréquence. On a établi que  $\beta^2$  peut s'exprimer par la relation empirique de l'équation (17) de la Recommandation UIT-R P.618.

Il apparaît que cette équation peut être modifiée pour tenir compte de l'influence des variations de l'angle d'élévation, en utilisant l'expression suivante:

$$\beta^2 = 10^{-4} (\sin \theta)^{0,5} d^{1,5} \quad (3.8)$$

mais tous les éléments de cette relation doivent encore être vérifiés.

La Figure 3.6 illustre la relation entre  $p_2$  et  $p_1$  déduite des équations (16) et (17) de la Recommandation UIT-R P.618.

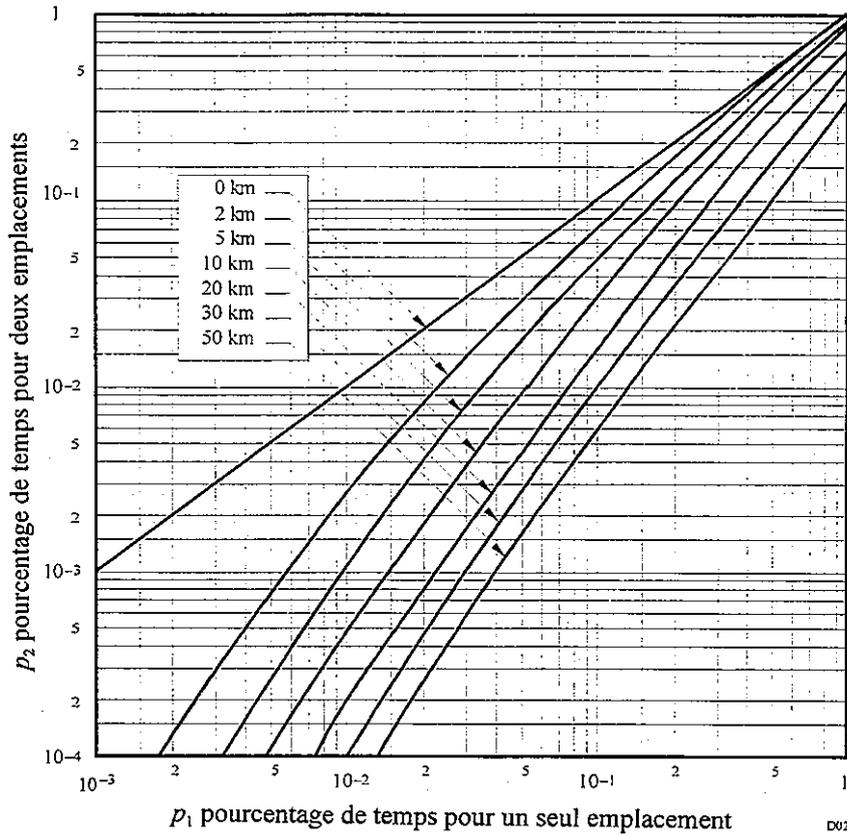


FIGURE 3.6

**Relation entre les pourcentages de temps avec et sans diversité d'emplacement pour un même affaiblissement**

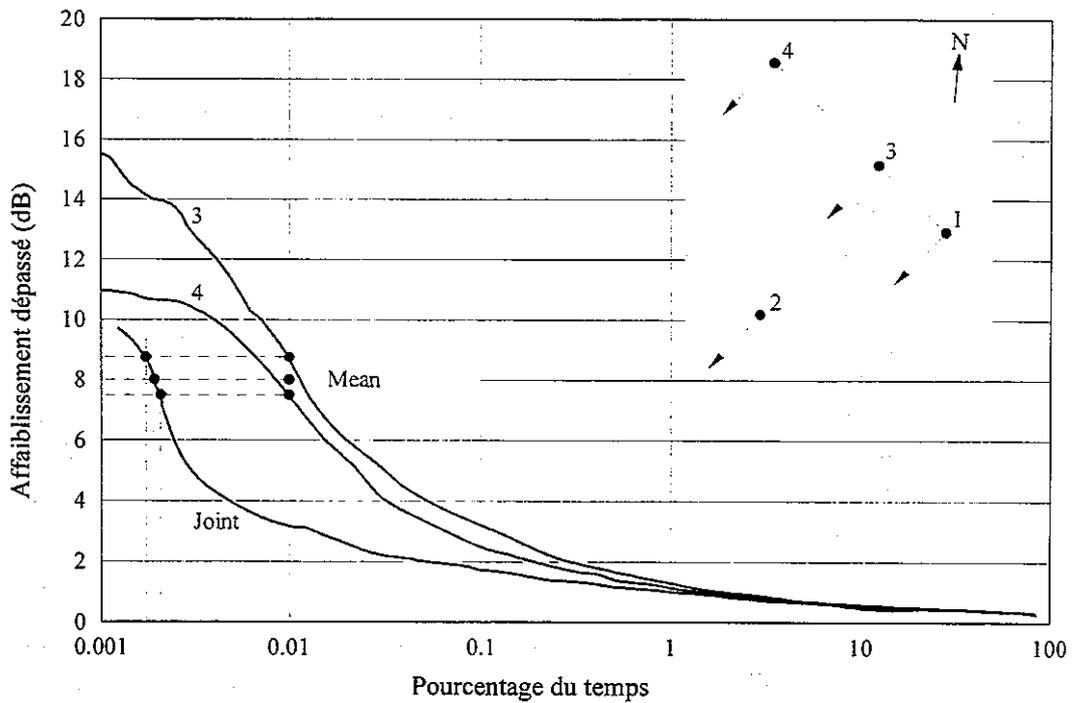


FIGURE 3.7

**Résultats obtenus sur deux emplacements dans le cadre d'une expérience de quadruple diversité d'emplacement menée sur la fréquence 12 GHz à Graz (Autriche) [Witternigg et autres, 1987]**

La Figure 3.7 présente les données obtenues sur les emplacements 3 et 4 dans le cadre d'une expérience faite à Graz (Autriche) à la fréquence de 12 GHz [Witternigg et autres, 1987]. L'encart en haut et à droite de la Figure 3.7 représente la configuration du réseau de quatre emplacements de radiomètres. La distance entre ces deux emplacements était de 15,4 km pour un angle d'élévation de  $26,4^\circ$  et l'angle entre l'azimut et l'orientation de la ligne de base était proche de  $90^\circ$ .

Pour une distance de 15,4 km entre les emplacements, on déduit  $\beta^2 = 0,00386$  de l'équation (17) de la Recommandation UIT-R P.618. Si on porte cette valeur de  $\beta^2$  dans l'équation (16), pour un affaiblissement moyen de 8 dB sur un emplacement unique pendant un pourcentage de temps  $p_1 = 0,01\%$ , on obtient:

$$I = 1 + (100 \times 0,00386)/0,01 = 39,6 \quad (3.9)$$

On déduit de la Figure 3.7 que l'avantage de diversité mesuré pour le pourcentage de temps 0,01% sur un emplacement unique est de  $0,01/0,002 = 5$ . A noter qu'on a utilisé la caractéristique moyenne sur un emplacement unique et non l'une ou l'autre des distributions sur un emplacement unique (comme indiqué au § 3.3.1.1).

Dans cet exemple, la valeur calculée de l'avantage de diversité est bien supérieure à la valeur mesurée, ce qui peut être dû aux limitations de l'échantillon de données (les résultats de la Figure 3.7 portent sur une seule année d'expérimentation). Pour de faibles pourcentages de temps, la Figure 3.7 montre que la caractéristique globale d'affaiblissement et les caractéristiques des deux emplacements individuels ne suivent pas la même tendance. Cela met en lumière le fait que l'utilisation de l'avantage de diversité comme méthode de prévision de la performance de diversité d'emplacement donne des résultats variables.

### 3.3.1.6.2 Gain de diversité

La méthode de la Recommandation UIT-R P.618 permet de calculer le gain de diversité,  $G$ , entre des couples d'emplacements de stations terriennes, avec les paramètres suivants:

- $d$ : distance entre les deux emplacements (km)
- $A$ : affaiblissement sur le trajet dû à la pluie pour un emplacement unique (dB)
- $f$ : fréquence (GHz)
- $\theta$ : angle d'élévation du trajet (degrés)
- $\psi$ : angle entre l'azimut du trajet de propagation et la ligne de base entre les emplacements, choisi de telle sorte que  $\psi \leq 90^\circ$  degrés.

Dans cette méthode de prévision, la partie du gain dû à la distance entre les emplacements des stations terriennes,  $G_d$ , pour une distance  $d$  (km), est donnée par l'équation (18) de la Recommandation UIT-R P.618; la partie du gain qui dépend de la fréquence,  $G_f$ , est donnée par l'équation (19); celle qui dépend de l'angle d'élévation,  $G_\theta$ , est donnée par l'équation (20) et celle qui dépend de la ligne de base,  $G_\psi$ , est donnée par l'équation (21). Le gain net de diversité  $G$  est le produit des quatre parties du gain:

$$G = G_d G_f G_\theta G_\psi \quad (\text{dB}) \quad (3.10)$$

Lorsque les résultats obtenus avec la méthode ci-dessus ont été comparés avec les données de la banque de données de diversité d'emplacement de l'UIT-R, on a trouvé une moyenne arithmétique de 0,14 dB et un écart type de 0,96 dB pour une erreur quadratique moyenne de 0,97 dB. Plus récemment [Allnutt, 1993], on a constaté que cette méthode de prévision du gain de diversité conduit à surestimer légèrement les résultats lorsque l'affaiblissement pour un emplacement unique est petit (c'est-à-dire que le gain prévu est supérieur à celui obtenu en pratique) et à les sous-estimer

légèrement lorsque l'affaiblissement pour un emplacement unique est élevé (c'est-à-dire que le gain prévu est plus faible que celui obtenu en pratique). La méthode donne, semble-t-il, les résultats les plus précis pour les niveaux des évanouissements sur un emplacement unique correspondant à 0,01% d'une année moyenne, ce qui représente un pourcentage de temps critique pour les systèmes à satellites à disponibilité élevée.

Comme pour le calcul de l'avantage de diversité donné ci-dessus, le gain de diversité sera calculé pour le même couple d'emplacements et le même ensemble de données (voir la Figure 3.7). Avec la méthode de calcul du gain de diversité présentée ci-dessus pour  $d = 15,4$  km,  $f = 12$  GHz,  $\theta$  (angle d'élévation) =  $26,4^\circ$  et  $\psi$  (angle entre l'azimut de la ligne de base et l'azimut de l'angle de vue) =  $90^\circ$ , on obtient avec les équations (18)-(21) de la Recommandation UIT-R P.618 les résultats suivants:

$$a = 5,1047 \text{ et } b = 0,3249, \text{ d'où}$$

$$G_d = 5,0704, G_f = 0,7483, G_\theta = 1,1584, G_\psi = 1,18$$

L'équation (22) permet de calculer la valeur estimée du gain de diversité  $G = 5,2$  dB.

La Figure 3.7 montre que la valeur mesurée du gain de diversité pour un pourcentage de temps de 0,01% est  $8 - 3,1 = 4,9$  dB. Comme on l'a noté précédemment, le gain de diversité est un paramètre relativement stable d'une année à l'autre. Dans le cas présent, la différence entre la valeur mesurée et la valeur prévue de ce gain était de 0,3 dB environ, soit une erreur d'environ 6%.

### 3.3.1.7 Facteurs influençant la performance de la diversité d'emplacement

On a effectué un certain nombre de mesures de diversité d'emplacement qui sont résumées dans différents documents de référence (par exemple, [Hodge, 1982; Ippolito et autres, 1983; Rogers et Allnutt, 1984]). Il existe des relations entre bon nombre des paramètres qui peuvent influencer sur une installation de diversité d'emplacement (par exemple orientation de la ligne de base, géométrie du trajet, relief local). Certaines de ces relations seront étudiées ci-après.

#### 3.3.1.7.1 Influence de la distance de séparation entre les emplacements

Le concept de diversité d'emplacement repose sur l'hypothèse que les dégradations de la propagation sur différents trajets sont plus ou moins décorréelées si la distance dans l'espace entre les différents trajets est suffisante. Inversement, les dégradations de la propagation pour des trajets identiques (c'est-à-dire des trajets parallèles avec une distance de séparation nulle) sont parfaitement corrélées. Entre ces limites, la distance entre les emplacements (ou entre les trajets) doit influencer profondément le gain de diversité. Des mesures font apparaître, et cela n'est pas surprenant, que la distance entre les emplacements,  $d$ , est le facteur déterminant pour la performance de diversité aux distances inférieures à 10-20 km [Hogg, 1987; Wilson et Mammel, 1973; Rogers et Allnutt, 1984].

L'influence de la distance entre les emplacements sur le gain de diversité,  $G$ , est illustrée à la Figure 3.8 [Hodge, 1976], à partir de données pour trois fréquences provenant de l'Ohio et du New Jersey (États-Unis d'Amérique). On constate que le gain de diversité augmente rapidement avec  $d$ , lorsque la distance entre les emplacements est comprise entre 0 et 10-15 km; au-delà de ces valeurs, les avantages liés à toute nouvelle augmentation de  $d$  sont limités. La distance entre les emplacements pour laquelle on obtient 95% du gain de diversité disponible varie quelque peu d'une mesure à l'autre et se situe entre 15 et 30 km environ [Hodge, 1978]. Ces différences peuvent s'expliquer par l'influence d'autres paramètres, par exemple la géométrie de la configuration, les différences climatiques ou l'influence du relief. Des données obtenues dans le cadre d'une expérience de diversité d'emplacement radiométrique à 11,6 GHz au Royaume-Uni [Hall et Allnutt, 1975] font apparaître la même tendance. Les deux ensembles de données sont comparés à la Figure 3.9, où l'on note quelques différences intéressantes entre les résultats.

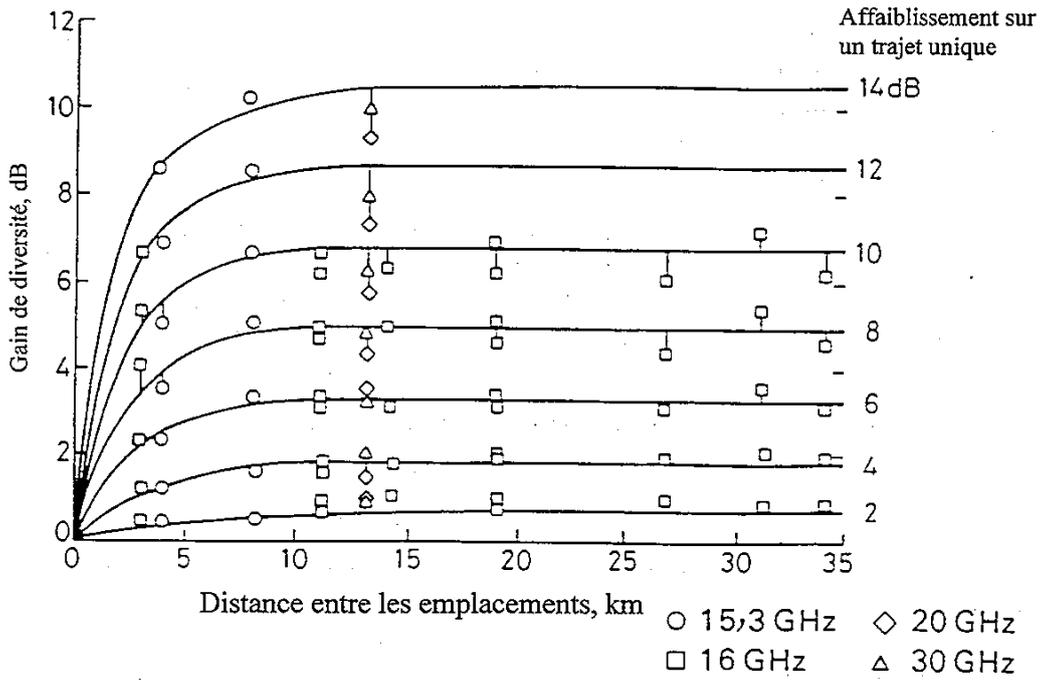


FIGURE 3.8

Gain de diversité en fonction de la distance entre les emplacements

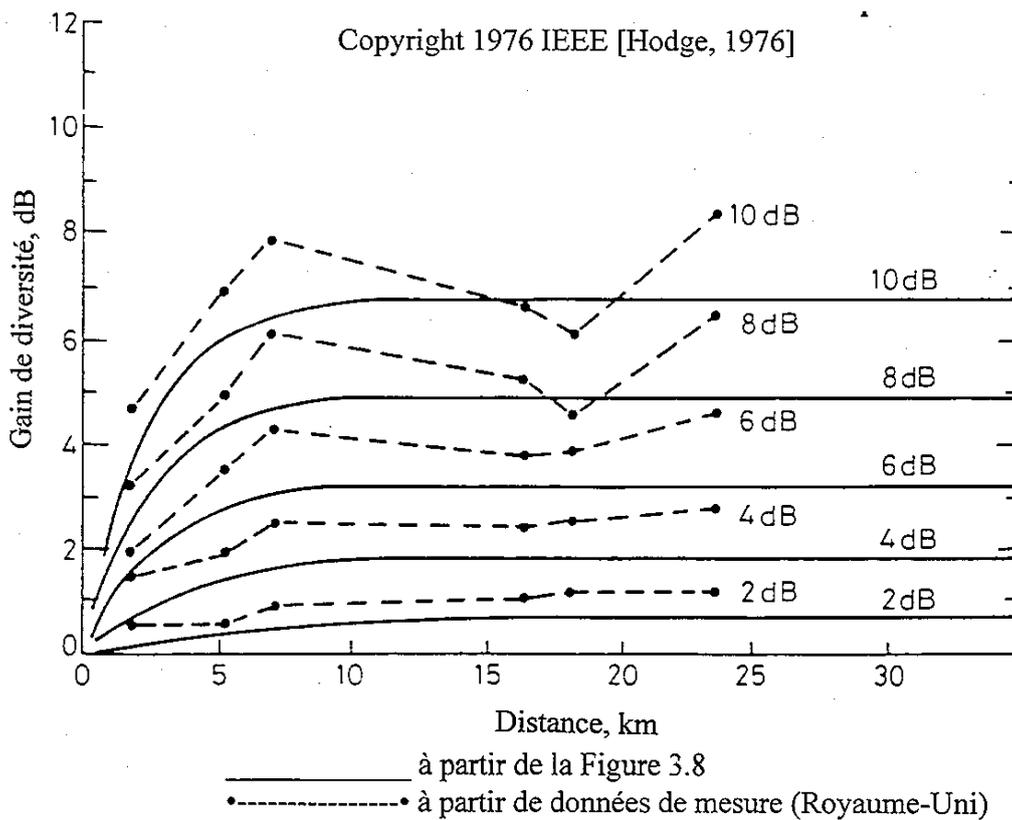


FIGURE 3.9

Gain de diversité en fonction de la distance entre les emplacements: comparaison entre les données obtenues respectivement aux États-Unis et en Europe (Reproduit avec la permission d'INTELSAT et de COMSAT)

En général, il semble que le gain de diversité obtenu dans l'expérience faite au Royaume-Uni soit supérieur à celui obtenu dans les expériences faites aux États-Unis, ce qui vient conforter l'argument selon lequel pour une distance donnée entre les emplacements, le gain de diversité décroît lorsque la fréquence augmente. La loi de dépendance est toutefois assez lâche, en particulier pour les angles d'élévation (25 à 55 degrés) utilisés dans ces expériences.

Par ailleurs, l'augmentation du gain de diversité avec la distance entre les emplacements semble être nettement plus forte dans l'expérience du Royaume-Uni que dans les expériences faites aux États-Unis pour de faibles distances entre les emplacements, ce qui concorde avec d'autres données européennes [Witternigg et autres, 1993, 1987]. Plus important, dans l'expérience britannique on observe une chute nette du gain de diversité lorsque la distance entre les emplacements est comprise entre 7 et 18 km, ce qui s'explique par le fait que deux cellules de pluie intenses et indépendantes ont traversé le réseau de diversité d'emplacement et ont causé des évanouissements simultanés dus à la pluie dans des emplacements très éloignés les uns des autres.

La loi de variation que l'on observe entre le gain de diversité et la distance entre les emplacements concorde avec les caractéristiques de probabilité conjointe de l'intensité de précipitation ponctuelle. On observe une décorrélation rapide de ces deux grandeurs avec l'augmentation de la distance entre les emplacements, jusqu'à ce que des effets de "saturation" commencent à limiter les grandeurs à une valeur correspondant à une décorrélation qui n'est pas absolument complète [Rogers, 1976; Barbaliscia et Paraboni, 1982]. Les statistiques correspondantes d'affaiblissement sur le trajet et d'intensité de précipitation ponctuelle pour des emplacements de diversité suivent souvent une tendance comparable, ce qui permet de penser qu'on peut utiliser les statistiques conjointes d'intensité de précipitation pour prévoir la performance de diversité d'emplacement; c'est d'ailleurs ainsi que l'on procède avec les méthodes de prévision utilisées pour convertir les statistiques d'intensité de précipitation ponctuelle en statistiques d'affaiblissement sur un trajet unique [Allnutt, 1978].

Étant donné que la structure de la pluie est limitée dans la direction verticale et que la configuration des précipitations dans le plan horizontal est souvent structurée en bandes, il se peut que la distance (dans le plan vertical et le plan horizontal) entre les trajets radioélectriques soit plus grande que la distance physique entre les emplacements [Rogers et Allnutt, 1984]. La géométrie de l'espacement entre les trajets dans le plan perpendiculaire est illustrée à la Figure 3.4 qui, par ailleurs, fait apparaître l'interdépendance entre d'une part la distance entre les trajets et d'autre part l'orientation de la ligne de base, l'azimut du trajet et l'angle d'élévation du trajet.

Pour une configuration donnée, le relief local et les facteurs climatiques (par exemple l'alignement entre la géométrie de la configuration et la direction des fronts météorologiques locaux ou bien toute anisotropie régionale dans les structures de pluie) peuvent eux aussi avoir une influence sur l'espacement entre les trajets. Cette influence n'est pas encore parfaitement connue mais des observations météorologiques [Rogers, 1976] ont permis de conclure qu'il était plus utile d'accroître la distance entre les trajets dans le plan horizontal que dans le plan vertical pour réduire la probabilité de dégradations simultanées sur les trajets, du moins pour des latitudes inférieures à 60 degrés et des angles d'élévation de plus de 3 degrés. A des angles d'élévation inférieurs à 3° environ, la scintillation troposphérique est si forte que l'on devra peut-être utiliser des techniques de diversité d'altitude pour améliorer les marges de qualité de fonctionnement et de disponibilité de la liaison [Acampora, 1981; Allnutt, 1993].

### 3.3.1.7.2 Influence de l'orientation de la ligne de base

Comme indiqué plus haut, des observations météorologiques [Rogers, 1976] font apparaître que plus grande est la distance de séparation entre des trajets dans le plan horizontal (pour une valeur donnée de la distance de séparation entre les emplacements), plus le gain de diversité sera important. D'après la Figure 3.4, la distance de séparation entre les trajets dans le plan horizontal est maximale si on oriente la ligne de base de diversité dans une direction perpendiculaire à l'azimut du trajet. Les données obtenues dans le cadre d'une expérience radiométrique faite sur trois emplacements à 15,5 GHz dans le New Jersey [Gray, 1973] et avec un réseau de radiomètres fonctionnant à 11,6 GHz sur six emplacements près de Slough (Royaume-Uni) [Hall et Allnutt, 1975] confortent cette idée. Une étude ultérieure [Allnutt, 1978] a elle aussi permis de conclure que l'orientation préférée de la ligne de base était la perpendiculaire au trajet radioélectrique. On a émis l'hypothèse [Hogg et Chu, 1975], toutefois, qu'on obtiendrait les meilleurs résultats pour les applications de diversité d'emplacement en orientant la ligne de base perpendiculairement au trajet radioélectrique et, accessoirement, à la direction du mouvement des fronts météorologiques convectifs. Des mesures approfondies effectuées aux États-Unis [Lin et autres, 1980] confirment cette hypothèse.

Des simulations radar de configurations de diversité faites sur Wallops Island, Virginie (États-Unis), avec des lignes de base parallèles aux azimuts des trajets obliques, ont montré qu'on préférerait orienter les lignes de base perpendiculairement à la direction prédominante de l'élongation des cellules [Goldhirsh, 1976]. Des mesures effectuées ultérieurement dans le cadre de l'expérience de diversité sur six emplacements dont il a été question plus haut ont elles aussi révélé que la direction dominante du mouvement des systèmes météorologiques peut avoir une influence sur la performance de diversité [MacKenzie et Allnutt, 1977]. D'autres simulations radar [Hodge, 1978; Furgusson et Rogers, 1978] et d'autres analyses [Mass, 1979] ont toutefois fait apparaître qu'il n'existait qu'une faible corrélation entre la performance de diversité et l'orientation de la ligne de base.

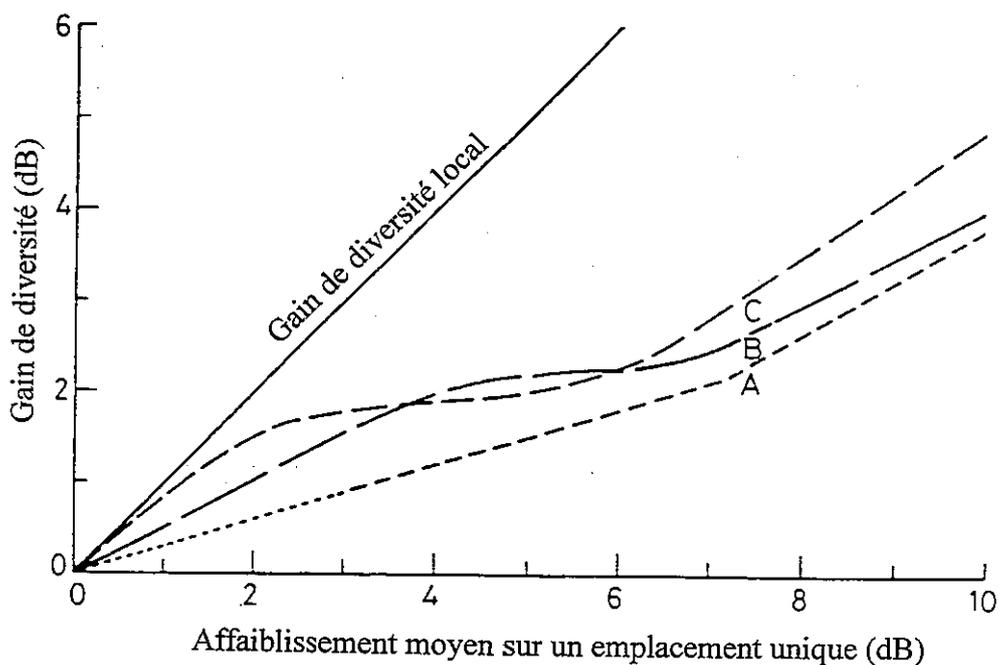
Les résultats ne sont donc pas concluants concernant l'orientation de la ligne de base; il faut vraisemblablement en conclure que cette orientation n'est pas le paramètre déterminant pour de nombreuses configurations de diversité et que l'interdépendance entre les paramètres susceptibles d'influer sur la performance de diversité est suffisamment grande pour qu'il soit difficile d'associer la performance observée à un seul et même paramètre (autre que la distance entre les emplacements ou les trajets). Par exemple, dans une expérience faite dans le sud de la province de l'Ontario (Canada), on obtenait systématiquement une performance de diversité médiocre, qu'on imputait aux précipitations orographiques induites par un escarpement parallèle à la ligne de base [Strickland, 1977]. Si l'on avait réorienté la ligne de base dans une direction perpendiculaire à celle de l'escarpement, on aurait peut-être pu annuler les effets de cette particularité topographique.

La probabilité de dégradations simultanées sur les trajets est inévitablement plus grande quand les azimuts des lignes de base et de trajets sont parallèles à de faibles angles d'élévation (car la distance entre les trajets dans le plan vertical sera faible), en particulier pour de petites distances entre les emplacements; l'orientation de la ligne de base sera donc un facteur important dans les cas de ce genre. Étant donné que dans une telle configuration la possibilité de dégradations simultanées par une seule et même cellule est élevée, l'orientation préférée de la ligne de base sera probablement la bissectrice de l'angle obtus formé par l'azimut du trajet et le grand axe de l'ellipsoïde d'anisotropie de la cellule (même si en général ce dernier élément d'information n'est pas connu et ne pourra donc pas toujours être pris en compte). Toutefois, lorsque la distance entre les emplacements est grande, la probabilité conjointe varie peu avec l'orientation de la ligne de base, ce que confirment les données de mesure.

### 3.3.1.7.3 Influence de la géométrie du trajet

La géométrie d'un trajet radioélectrique est définie par l'azimut,  $\psi$ , et l'angle d'élévation,  $\theta$ , de ce trajet. Dans la plupart des cas, les effets découlant de l'orientation de la ligne de base marquent la variation en fonction de l'angle d'azimut, étant donné que c'est l'angle relatif entre le trajet et la ligne de base qui, semble-t-il, est important pour déterminer le gain de diversité. On a démontré que l'influence de l'angle d'azimut était importante dans certaines configurations à emplacement unique [Rucker, 1980], même si les effets observés dans une expérience de double diversité d'emplacement étaient peut-être moins marqués.

On observe souvent que l'angle d'élévation influence fortement les dégradations de la propagation sur un trajet unique. La longueur du trajet oblique à travers la troposphère augmente rapidement lorsque l'angle d'élévation diminue, ce qui accroît l'occurrence et la gravité des dégradations sur un trajet unique. Parallèlement, la probabilité de dégradations simultanées devrait elle aussi augmenter, ce que confirment des mesures de diversité. Près de Slough (Royaume-Uni) [Allnutt, 1977], on a constaté qu'à 11,6 GHz le gain de diversité pour un angle d'élévation de  $6^\circ$  était environ la moitié de celui obtenu pour un angle d'élévation de  $30^\circ$  et une distance entre les emplacements de 7,1 km. On a observé qu'à 11 GHz les courbes du gain de diversité étaient similaires sur des trajets à l'ouest du Japon (angle d'élévation de  $6^\circ$  et distance entre les trajets de 17 km) [Rogers, 1981] et en Virginie (États-Unis) (angle d'élévation de  $11^\circ$  et distance de 7,3 km) [Towner et autres, 1982]. Ces courbes du gain de diversité sont données dans la Figure 3.10.



- A: Slough, Royaume-Uni ( $D = 7,1$  km,  $\theta = 6^\circ$ )
- B: Kurashiki, Japon ( $D = 17$  km,  $\theta = 6^\circ$ )
- C: Blacksburg, États-Unis d'Amérique ( $D = 7,3$  km,  $\theta = 11^\circ$ )

FIGURE 3.10  
Profil du gain de diversité pour de faibles angles d'élévation  
(Reproduit avec l'autorisation d'INTELSAT et de COMSAT)

Les courbes du gain de diversité sont relativement plates pour des affaiblissements moyens sur un emplacement unique compris entre 3 dB environ et 6 dB: dans cette fourchette, les accroissements de la performance de diversité sont minimaux et on observe parfois une décroissance qui semble caractéristique des expériences faites sous de faibles angles d'élévation. Cet "aplatissement" de la caractéristique du gain de diversité pourrait s'expliquer par la présence simultanée de deux cellules de pluie distinctes au-dessus des deux stations terriennes. Il est par ailleurs très probable toutefois que si les mesures se poursuivaient sur plusieurs années, la partie plate s'harmoniserait avec la forme de la caractéristique globale, donnant un accroissement monotone du gain de diversité en fonction de l'affaiblissement sur un emplacement unique [Witternigg et autres, 1987].

On considère donc que la caractéristique apparemment aplatie ou non monotone, observée dans les expériences de diversité d'emplacement faites sous de faibles angles d'élévation, est due à des erreurs d'échantillonnage (données insuffisantes pour obtenir des résultats stables). Il apparaît toutefois clairement que plus l'angle d'élévation du trajet diminue plus la performance de diversité est mauvaise et que l'angle d'élévation (voir la Figure 3.10) peut être un élément déterminant pour des trajets dont l'angle d'élévation est inférieur à 15° environ. Pour des angles d'élévation plus grands, la performance de diversité varie peu avec l'angle d'élévation du trajet.

#### **3.3.1.7.4 Influence de la fréquence**

La performance de diversité devrait diminuer avec l'augmentation de la fréquence car les configurations de pluie continue de faible intensité influenceront alors plus fortement sur les statistiques relatives à un trajet unique. La corrélation entre ces phénomènes de grande ampleur est plus forte sur de grandes distances, ce qui fait que la décorrélation entre les trajets devrait diminuer. Des mesures, déjà anciennes, du gain de diversité à des fréquences comprises entre 11 et 30 GHz ont toutefois fait apparaître que le gain semble être pratiquement indépendant de la fréquence [Goldhirsh et Robison, 1975; Hodge et autres, 1976]. Une analyse ultérieure [Hodge, 1982] de l'influence résiduelle apparente de la fréquence sur le gain de diversité (après suppression de l'influence estimée de la distance entre les emplacements) a fait apparaître elle aussi une faible dépendance. La dépendance du gain de diversité à l'égard de la fréquence n'a pas été testée sur des trajets présentant un faible angle d'élévation, mais il est probable que sur ces trajets l'influence de la fréquence sera grande, en particulier au-dessus de 30 GHz où l'affaiblissement par les gaz et les nuages devient important.

#### **3.3.1.7.5 Influence des facteurs météorologiques et topographiques locaux**

La performance de diversité peut être influencée par le relief local étant donné que les caractéristiques topographiques modifient souvent les caractéristiques des précipitations [Harrold et Austin, 1974] comme on l'a noté précédemment [Strickland, 1977]. En apparence on peut observer à la fois des zones où les précipitations sont très élevées [Strickland, 1977] et des zones d'ombre pluviométrique [MacKenzie et Allnutt, 1977]. Il est possible généralement de prévoir des phénomènes orographiques de ce type, même si leur importance reste difficile à évaluer. La présence d'un relief géographique important (une colline, une rivière, un lac, etc.) entre les différents emplacements devrait toujours augmenter la décorrélation entre les emplacements [Szuppa et autres, 1993].

Placer deux stations de diversité à des hauteurs très différentes au-dessus du niveau moyen de la mer [Otsu et autres, 1978] permettrait peut-être d'obtenir un gain de diversité supérieur à la normale car le trajet troposphérique jusqu'à la station la plus élevée serait beaucoup plus court. Ce ne sera peut-être pas toujours le cas [Misme et Waldteufel, 1982]: des problèmes logistiques ou autres, ou

des conditions météorologiques défavorables pourraient en effet compromettre certains des avantages liés à l'implantation d'une station au sommet d'une montagne. Il ne fait aucun doute toutefois que, pour des angles d'élévation inférieurs à 3° et à des latitudes élevées [Mimis et Smalley, 1982; Gutteburg, 1983; Bryant, 1992], les stations devraient de préférence être situées à des hauteurs différentes (comme c'est le cas pour l'exploitation en diversité d'espace de stations de Terre en visibilité directe).

### 3.3.2 Distribution statistique du niveau des signaux sur des zones étendues

Les systèmes à satellites de demain qui desserviront simultanément de très nombreuses stations terriennes très dispersées pourront avoir recours au traitement à bord pour attribuer de façon dynamique des ressources supplémentaires aux stations terriennes qui ont besoin d'une marge de liaison ou d'une capacité supplémentaires. La technique est celle de l'AMRT avec utilisation partagée des ressources [Acampora, 1981; v Hugo et Wilde, 1994], dans laquelle une réserve de capacités supplémentaires (tranches réservées de la trame AMRT) peut être attribuée aux utilisateurs qui ont besoin d'une ressource supplémentaire. L'attribution se ferait de façon dynamique et pourrait être gérée par une station de commande principale au sol ou, dans des formules plus évoluées, d'une unité de traitement à bord même du satellite.

Pour évaluer la capacité supplémentaire dont on a besoin dans un système d'utilisation partagée des ressources, il faut connaître la probabilité d'occurrence d'interruptions simultanées dans les stations terriennes. Des études de diversité à grande échelle [Barbaliscia et autres, 1988a, 1988b, 1989] montrent que l'attribution dynamique des ressources entre un nombre important de stations terriennes pourrait réduire sensiblement la probabilité d'interruptions dues à la pluie dans les différentes stations terriennes. Toutefois, ces mêmes études font apparaître que l'hypothèse d'une indépendance statistique entre les différentes stations terriennes peut conduire à sous-estimer la probabilité d'interruptions dans telle ou telle station terrienne car il subsiste une corrélation de pluviosité entre les stations terriennes pour des distances de séparation allant jusqu'à 800 km [Dintelmann et autres, 1993].

Pour un système à satellites fonctionnant avec  $N$  stations terriennes et avec un nombre  $M$  de ressources communes supplémentaires, on peut définir deux éléments de conception:

- a) la probabilité de "demandes excessives" adressées au système embarqué et à ses ressources; et
- b) la probabilité pour telle ou telle station terrienne de ne pas "être aidée" et sa position hiérarchique éventuelle parmi les  $N$  stations.

Les deux probabilités peuvent s'exprimer par une somme pondérée des probabilités d'évanouissements simultanés pour les diverses combinaisons de  $N$  stations [Barbaliscia et autres, 1989].

Dans un cas simple de couples de stations ( $N = 2$ ,  $M = 1$ ), on peut donner une formule empirique approximative exprimant la probabilité d'événements de pluie simultanés en fonction de la distance  $d$  (km) et de la hauteur de pluie dans la gamme 0 à 6 mm/h:

$$P_{ij} = A_1 e^{-\left(\frac{d}{D_1}\right)} + A_2 e^{-\left(\frac{d}{D_2}\right)^2} \quad (3.11)$$

avec:

Cas 1

$$A_1 = 33 H^{-0,92}$$

$$D_1 = 592 - 22 H \quad \text{où } H \text{ est la hauteur de pluie journalière (mm/jour)}$$

$$A_2 = 0,2 \quad \text{pour } H \leq 20 \text{ mm/jour}$$

$$D_2 = 1\,400$$

Cas 2

$$A_1 = 0,3 R^{-0,6}$$

$$D_1 = 195 - 30 R \quad \text{où } R \text{ est le taux de précipitation (mm/h)}$$

$$A_2 = 0,02 \quad \text{pour } R \leq 6 \text{ mm/h}$$

$$D_2 = 500$$

On utilisera les paramètres du cas 1 lorsqu'on a besoin de connaître la probabilité conjointe d'occurrence d'une quantité de pluie cumulative par jour, et les paramètres du cas 2 lorsqu'on a besoin de connaître la probabilité conjointe d'une intensité de précipitation donnée. On notera que l'intensité de précipitation indiquée dans le cas 2, bien qu'exprimée en mm/h, est en fait l'intensité de précipitation moyenne sur la période d'intégration de probabilité conjointe nécessaire (en l'occurrence une heure).

Pour le cas plus général de  $N$  stations et  $M$  ressources, on a élaboré un modèle qui repose sur l'hypothèse d'une distribution log-normale de la pluie, et qui est en bon accord avec les données expérimentales. Il convient de noter que cette distribution log-normale s'applique uniquement à la fraction de temps pendant laquelle l'intensité de précipitation est supérieure à 0 simultanément aux emplacements de toutes les  $N$  stations terriennes.

### 3.3.3 Autres techniques de diversité

S'il est impossible d'accroître la marge (par exemple, grâce à l'application d'une régulation de puissance par augmentation du gain d'émission, de la puissance d'émission ou des ressources mises en oeuvre dans la trame AMRT), les systèmes à satellites peuvent utiliser essentiellement trois types de techniques de diversité pour compenser les effets des dégradations observées dans telle ou telle station terrienne: la diversité de temps, la diversité de fréquence et la diversité d'emplacement. La diversité d'emplacement a déjà été étudiée dans ce Manuel, mais il existe une autre technique, la diversité d'orbite, qui fournit une mesure de la diversité de trajet. On trouvera dans les paragraphes suivants une brève description de la technique de diversité d'orbite et des deux autres techniques de diversité.

#### 3.3.3.1 Diversité d'orbite

La diversité d'orbite [Capsoni et Matricciani, 1984] diffère de la diversité d'emplacement en ce sens qu'on a un seul emplacement de station terrienne. Pour assurer une certaine diversité, la station terrienne utilise deux antennes qui peuvent avoir accès simultanément à des satellites différents. La technique de diversité d'orbite ne nécessite pas la présence d'une liaison d'interconnexion de diversité entre les emplacements comme c'est le cas pour la diversité d'emplacement; cependant, pour obtenir une décorrélation suffisante des affaiblissements concomitants le long des deux trajets, l'angle formé par les deux trajets à l'emplacement de la station terrienne doit être grand.

Toutefois, si cet angle est grand, l'angle d'élévation d'une au moins des deux liaisons, voire des deux, sera relativement petit et les liaisons seront donc plus vulnérables aux dégradations que pour des angles d'élévation élevés. Quoi qu'il en soit, le gain de diversité qu'on peut obtenir est assez faible; il est au mieux de l'ordre de 2-3 dB dans la bande des 14/11 GHz.

### **3.3.3.2 Diversité de fréquence**

Les affaiblissements dus à la présence de particules sur le trajet augmentent avec la fréquence, en particulier les affaiblissements dus à la pluie. A 6/4 GHz, l'affaiblissement dû à la pluie est négligeable; à 14/11 GHz, il peut être important dans les régions caractérisées par de fortes précipitations; à 30/20 GHz, c'est la principale cause de dégradation des liaisons, quelles que soient les régions considérées. S'il est possible de commuter les communications vers une autre bande de fréquences moins élevée, on pourra améliorer sensiblement la disponibilité [Mangulis, 1985].

Pour ce faire, il faut que les deux bandes de fréquences (la bande de fréquences élevée qui est perturbée et la bande basse vers laquelle les canaux des communications seront commutés) soient simultanément disponibles à la station terrienne considérée. De plus, il faut pouvoir disposer d'une capacité de réserve dans la bande de fréquences basse chaque fois qu'on en aura besoin, ce qui suppose d'une part qu'il faut pouvoir offrir une capacité de réserve importante si la liaison est une liaison à forte capacité et d'autre part que le réseau dans son intégralité soit soumis à une commande dynamique. Ces deux conditions exigent des investissements importants pour être réalisées. Si le réseau est soumis à une commande dynamique et si la capacité supplémentaire dans la bande de fréquences basse est disponible sur demande, la diversité de fréquence peut sans aucun doute améliorer grandement la disponibilité.

### **3.3.3.3 Diversité de temps**

Les pluies intenses sont généralement limitées dans le temps à un endroit donné. On peut tirer parti de cette caractéristique pour les liaisons de communication où il n'est pas nécessaire d'avoir un dialogue entre l'appelant et le destinataire, par exemple l'envoi d'une télécopie: si une télécopie est envoyée sans erreurs dans un laps de temps de deux heures, par exemple, on peut dire que le service est acceptable. Le retard dans l'envoi de la télécopie peut être considéré comme une forme de diversité de temps.

Cette caractéristique pourrait aussi être utilisée avec profit pour dimensionner la capacité dont une liaison donnée a besoin pour une performance économique optimale. Si une liaison est dimensionnée pour la capacité maximale attendue, elle disposera d'une capacité supplémentaire pendant la plus grande partie du temps. Si certaines transmissions peuvent être retardées et activées par exemple en dehors des heures de pointe, la capacité requise pourra être réduite. Le retard pourrait donc être utilisé soit en période de capacité de pointe (équivalent du blocage d'appel), soit lorsque la station terrienne subit de fortes précipitations.

La réduction du débit de données est une autre forme de diversité de temps qui permet d'accroître la marge disponible. La réception de l'information dans ce cas est retardée car le débit de transmission est réduit.

## **3.4 Caractéristiques des événements de précipitation**

Les caractéristiques des événements de précipitation sont importantes pour la conception et la mise en oeuvre des différentes techniques de protection contre les évanouissements telles que la régulation de puissance, la diversité, le codage et le partage des ressources. Par ailleurs, elles doivent être prises en compte pour déterminer la qualité de fonctionnement des réseaux numériques

utilisant des liaisons par satellite. La durée des évanouissements ou l'intervalle de temps pendant lequel l'affaiblissement du signal dépasse un seuil donné, les intervalles séparant les épisodes d'évanouissement, les intervalles séparant les événements d'évanouissement et la vitesse de variation de l'affaiblissement sont les caractéristiques dynamiques les plus importantes pour la modélisation des systèmes à satellites. Pendant un événement de précipitation, le niveau d'évanouissement varie beaucoup, franchissant plusieurs fois, en un laps de temps relativement bref, un seuil d'évanouissement donné; les événements de précipitation quant à eux sont séparés par un laps de temps plus long (voir la Figure 3.11) [Kumar, 1985; Vogel et autres, 1993]. Le début d'un événement de précipitation correspond au moment où le niveau d'évanouissement dépasse un seuil donné et la fin au moment où ce même niveau tombe en dessous de ce seuil puis est suivi d'un long intervalle pendant lequel le niveau d'évanouissement se rapproche de la valeur observée par atmosphère claire. Pendant l'événement de précipitation, il peut y avoir plusieurs crêtes de courte durée séparées par plusieurs brefs intervalles. Les crêtes sont appelées épisodes d'évanouissement et les intervalles inter-épisodes ou intervalles inter-évanouissements. L'intervalle relativement plus long qui sépare des événements d'évanouissement est l'intervalle inter-événements.

Les événements de précipitation s'accompagnent souvent de scintillations troposphériques; il faut donc préciser les caractéristiques ci-dessus en présence et en l'absence de scintillations. Les caractéristiques des scintillations sont examinées au Chapitre 6. Les scintillations correspondent à des variations relativement rapides de l'amplitude du signal; elles peuvent être séparées des variations plus lentes produites par les particules de précipitation à l'aide d'un filtre passe-bas. Il semble que les constantes de temps convenant pour l'objectif recherché soient de l'ordre de 120 secondes [Karasawa et Matsudo, 1991]. La Figure 3.12 donne un exemple dans lequel un filtre à moyenne mobile avec intégration toutes les minutes permet de séparer les évanouissements dus à la pluie des scintillations; les données ont été collectées à l'aide d'un signal de radiobalise à 11 GHz pour un angle d'élévation de  $6,5^\circ$ .

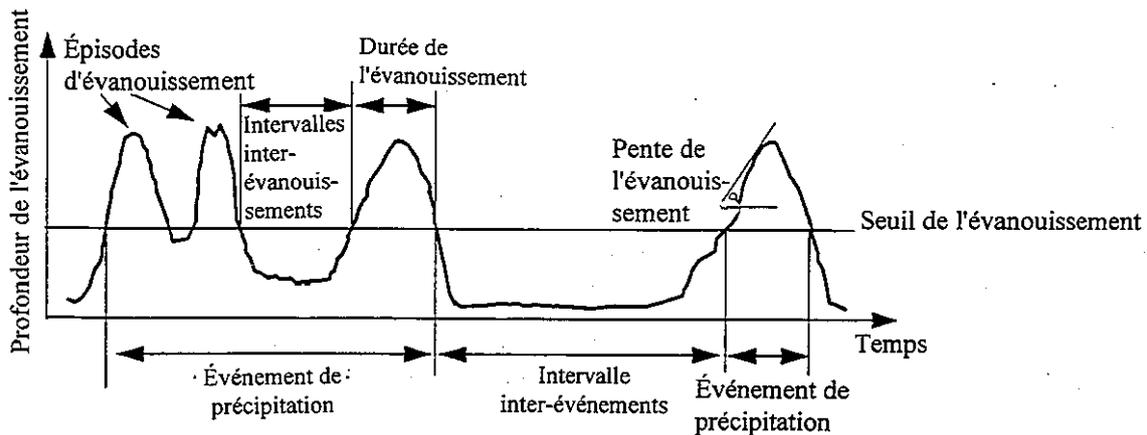
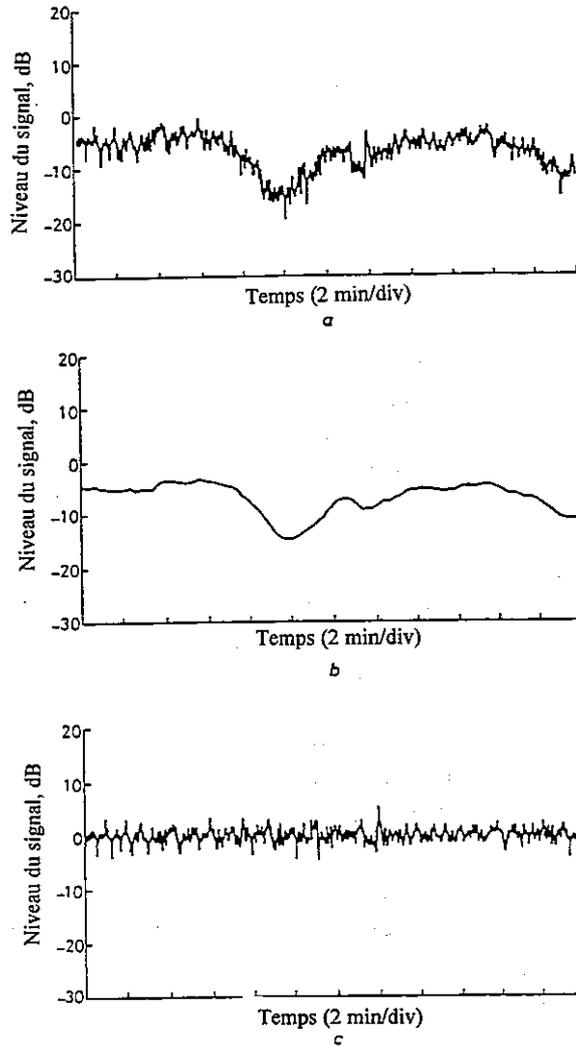


FIGURE 3.11

**Caractéristiques couramment utilisées pour caractériser les événements de précipitation**



- a) Données d'origine à 11 GHz pour un angle d'élévation de 6,5°.
- b) Données lissées à l'aide d'une moyenne mobile avec intégration toutes les minutes (affaiblissement à 11 GHz).
- c) Différence entre les données d'origine et les données lissées (scintillation à 11 GHz).

FIGURE 3.12

**Séparation des scintillations des évanouissements dus à la pluie de [Allnutt, 1989] à partir d'un travail original de Karasawa**

**3.4.1 Durée des évanouissements individuels**

En général, la durée des évanouissements dépend de la fréquence, de l'angle d'élévation et du type de pluie. Pour un seuil d'évanouissement donné, la durée des évanouissements augmentera avec la fréquence et diminuera avec l'angle d'élévation. Des données expérimentales montrent que ces lois de dépendance suivent approximativement la loi de variation entre d'une part l'affaiblissement dû à la pluie et d'autre part la fréquence et l'angle d'élévation [Kumar, 1985; Allnutt, 1989]. Par conséquent, la loi de variation entre la fréquence et la durée des évanouissements, pour un angle d'élévation fixe, est donnée approximativement par la formule:

$$\frac{\text{Nombre total d'évanouissements avec } A > x \text{ dB à } f_1}{\text{Nombre total d'évanouissements avec } A > x \text{ dB à } f_2} \approx \left( \frac{f_1}{f_2} \right)^2 \quad (3.12)$$

où  $A$  est la profondeur des évanouissements (dB),  $x$  le seuil (dB) auquel les évanouissements sont comptés et  $f$  la fréquence. On trouvera dans la Recommandation UIT-R P.618 une loi de similitude en fréquence plus rigoureuse. La loi de dépendance entre l'angle d'élévation et l'affaiblissement dû à la pluie à une fréquence fixe peut être exprimée par la formule:

$$\frac{\text{Nombre total d'évanouissements} > A \text{ à } \theta_1}{\text{Nombre total d'évanouissements} > A \text{ à } \theta_2} \approx \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} \quad (3.13)$$

où  $\theta$  est l'angle d'élévation.

Il est probable que la loi de variation entre l'angle d'élévation et la durée de l'affaiblissement exprimée dans l'équation (3.13) ne sera vraie que pour des angles d'élévation moyens ou élevés, lorsque les évanouissements sont produits par des cellules de pluie individuelles. À de petits angles d'élévation, il n'est pas rare que plusieurs cellules de pluie interviennent dans le processus d'évanouissement, d'où une relation plus complexe entre l'angle d'élévation et la durée de l'évanouissement.

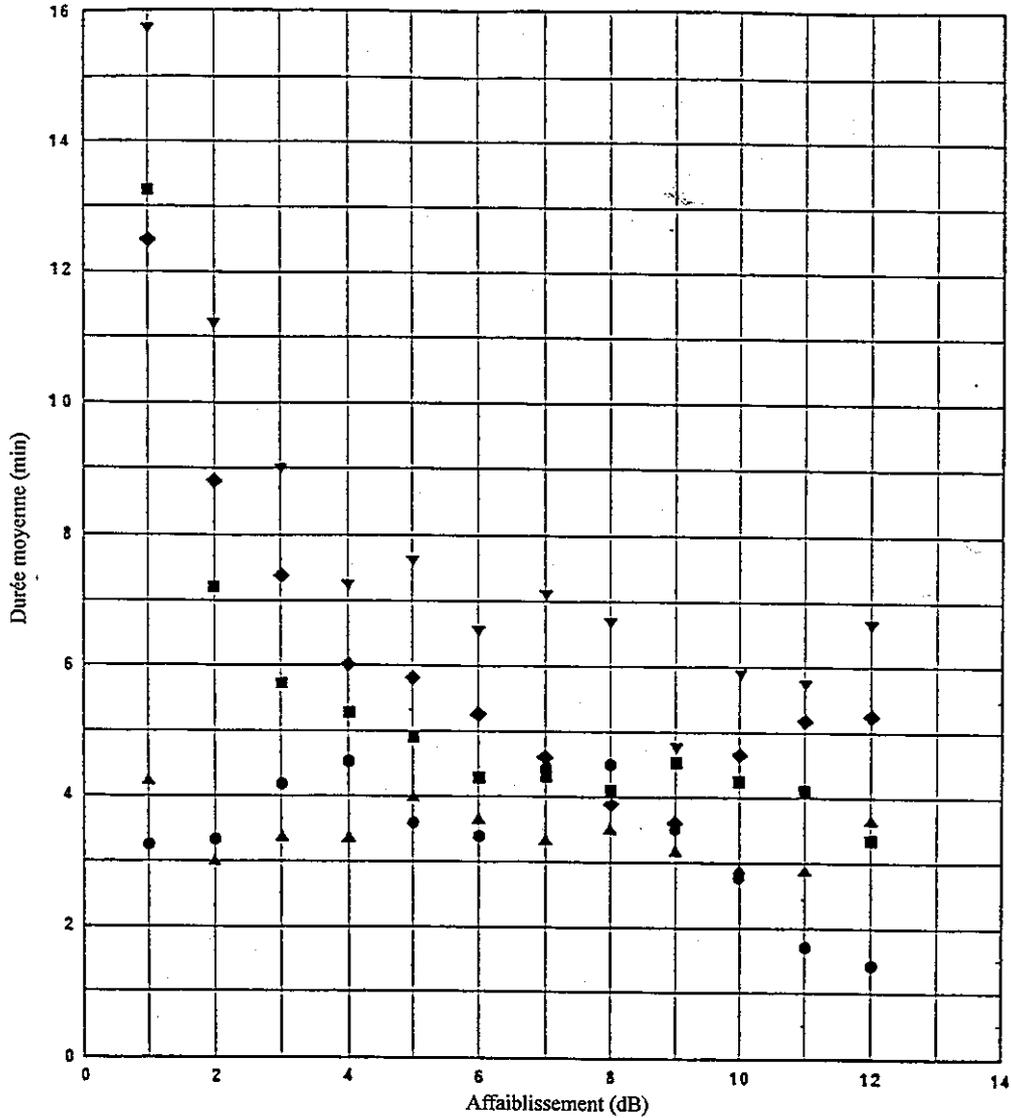
L'influence du type de pluie sur la durée des évanouissements est directement liée au temps d'imprégnation moyen des structures de pluie. Les temps d'imprégnation ont tendance à être plus longs pour de fortes pluies que pour des pluies d'orage.

Il semble qu'il n'y ait pas de dépendance entre la durée moyenne des évanouissements dépassant un seuil donné et le niveau de ce seuil, ce qui s'explique par le fait que le nombre d'évanouissements augmente lorsque le seuil d'évanouissement diminue sans qu'il y ait pour autant un lien visible entre ces deux paramètres. Le pourcentage de temps plus important pendant lequel un seuil d'évanouissement plus faible est dépassé est réparti sur un plus grand nombre d'évanouissement et le pourcentage de temps plus faible pour un seuil d'évanouissement plus élevé est réparti sur un nombre plus petit d'évanouissements. Un exemple de durée moyenne des évanouissements est donné à la Figure 3.13, à partir de données de [Flavin, 1982].

La Figure 3.13 fait apparaître que la durée moyenne des évanouissements pour la plupart des seuils d'évanouissement est d'environ 5 minutes, ce qui semble être le cas pour la plupart des trajets et la plupart des climats, si l'on fait abstraction des régions qui subissent des cataclysmes comme les ouragans. L'étalement de la durée des évanouissements autour de la valeur moyenne augmente au fur et à mesure que le seuil d'évanouissement diminue. Par exemple, il est courant d'observer des évanouissements de plus d'une heure pour un seuil de 3 dB aux fréquences supérieures à 14 GHz environ; par ailleurs, il est moins probable qu'un évanouissement de 20 dB dure plus de trois ou quatre fois la valeur moyenne, ce qu'illustrent les statistiques relatives à la durée des évanouissements (voir Figure 3.14) [Cox et Arnold, 1982]. Les courbes représentent le nombre moyen d'évanouissements par année d'une durée égale ou supérieure à la valeur portée en abscisse et sont tracées avec et sans hystérésis de 1 dB. L'utilisation de l'hystérésis supprime les fluctuations du signal dues aux effets des équipements et, dans une certaine mesure, aux scintillations troposphériques. La suppression par hystérésis des fluctuations de courte durée pour des seuils de 5 et 10 dB est évidente. La présence d'un nombre important d'évanouissements de longue durée à des seuils plus faibles est elle aussi évidente. Ces deux phénomènes semblent disparaître lorsque la profondeur des évanouissement est supérieure ou égale à 20 dB.

Les données de mesure indiquent que la durée des évanouissements dépassant un seuil donné suit une distribution log-normale d'évanouissements de longue durée composées essentiellement d'évanouissements dus à la pluie [Lin et autres, 1980; Dissanayake et autres, 1990]. Les évanouissements de plus courte durée, dus essentiellement aux scintillations troposphériques,

peuvent être représentés par une loi en puissance [Paraboni et Riva, 1994]. On trouvera dans la banque de données de la Commission d'études 3 de l'UIT-R des exemples de distributions de durée des évanouissements similaires à celles présentées à la Figure 3.14 (voir la Recommandation UIT-R P.311). En l'absence de données de mesure appropriées, on peut utiliser le modèle empirique décrit par Paraboni et Riva [1994] pour prévoir les distributions de durée des évanouissements.



- ▼ Darwin, Australie 14 GHz  $\theta = 60^\circ$  (Nov. 1977- Mai 1979)
- ◆ Darwin, Australie 11 GHz  $\theta = 60^\circ$  (Nov. 1977- Mai 1979)
- Innisfail, Australie 11 GHz  $\theta = 45^\circ$  (Oct. 1978- Avr. 1979)
- ▲ Melbourne, Australie 14 GHz  $\theta = 45^\circ$  (Juin 1980- Juin 1983)
- Melbourne, Australie 11 GHz  $\theta = 45^\circ$  (Juin 1980- Juin 1983)

FIGURE 3.13

Durée moyenne des évanouissements en fonction du niveau des évanouissements [Flavin, 1982]

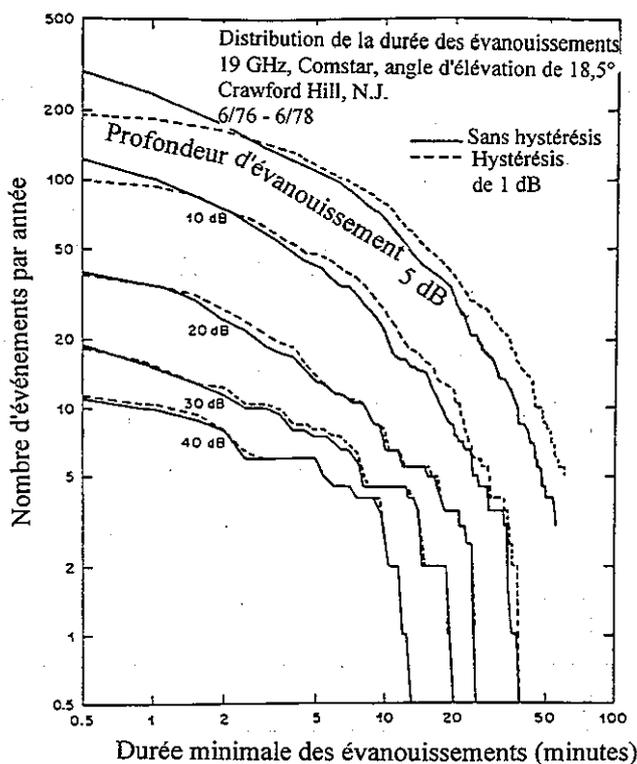


FIGURE 3.14

**Distribution cumulative de la durée des évanouissements  
[Cox et Arnold, 1982]**

**3.4.2 Intervalles inter-évanouissements et intervalles inter-événements**

Il est important d'avoir des données sur les intervalles inter-évanouissements dans des applications comme la commutation en diversité où un nombre excessif de commutations risque de nuire à la qualité de fonctionnement des systèmes. Les intervalles inter-événements, qui concernent la période retour des événements de précipitation, sont importants pour la gestion du réseau et la réaffectation des ressources à grande échelle.

En règle générale, les intervalles inter-évanouissements et les intervalles inter-événements dus à la pluie suivent une distribution log-normale [Kumar, 1985; Vogel et autres, 1993]. Cela étant, les intervalles inter-évanouissements de courte durée dus aux scintillations troposphériques devraient suivre une distribution assimilable à une loi en puissance comme pour les évanouissements de courte durée.

La Figure 3.15 donne un exemple dans lequel les distributions des intervalles inter-évanouissements et des intervalles inter-événements sont représentées séparément [Vogel et autres, 1993]. Les données ont été obtenues à partir d'une expérience faite avec une radiobalise fonctionnant à 11,2 GHz sous un angle d'élévation de 5,8°. On a analysé les données en utilisant un intervalle minimal d'atmosphère claire de 4,2 heures pour séparer les intervalles inter-événements et les intervalles inter-épisodes ou intervalles inter-évanouissements. On a constaté que l'intervalle moyen inter-événements entre des évanouissements de 20 dB était de 9,27 jours. Pour un seuil de 20 dB, on a établi que les 90% centraux des intervalles inter-évanouissements se situaient entre 80 secondes et 1,7 heure. La figure montre également le nombre moyen d'événements par année et le

nombre d'épisodes d'évanouissement par événement. On constate que ce dernier augmente au fur et à mesure que décroît le seuil d'évanouissement.

La Figure 3.16 donne un exemple de distribution conjointe d'intervalles inter-évanouissements et d'intervalles inter-événements à partir d'une expérience faite avec une radiobalise de satellite fonctionnant à 19 GHz [Cox et Arnold, 1982]. Les courbes montrent le nombre d'intervalles par année d'une durée égale ou supérieure à la valeur portée en abscisse et sont tracées avec ou sans hystérésis de 1 dB. Comme cela a été dit précédemment, l'hystérésis supprime les fluctuations rapides du signal dues aux effets des équipements et, dans une certaine mesure, aux scintillations troposphériques. On constate que la pente de la distribution varie avec la profondeur d'évanouissement. Des seuils d'évanouissement élevés sont caractérisés par des intervalles plus longs composés essentiellement d'intervalles inter-événements de plus de 6 heures. Pour les seuils d'évanouissement moins élevés, la variabilité est beaucoup plus grande puisque pour un seuil de 5 dB près de la moitié des intervalles durent moins d'une heure.

On peut essayer d'appliquer une similitude en fréquence et en angle d'élévation aux intervalles inter-évanouissements en utilisant les relations examinées pour la durée des évanouissements (voir le paragraphe précédent).

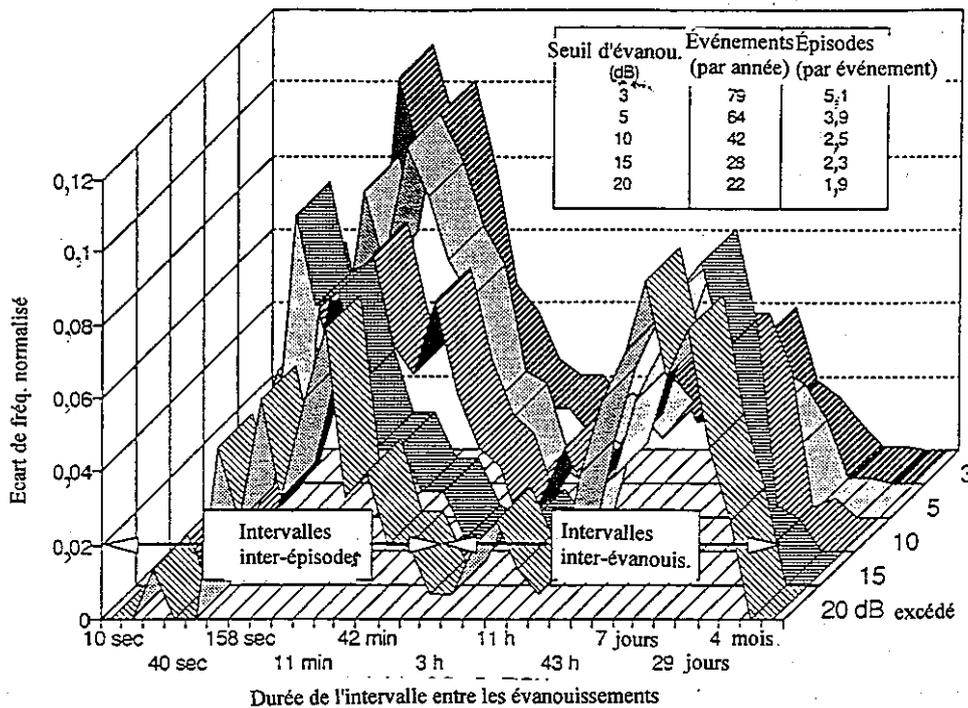


FIGURE 3.15

**Histogrammes de durée des intervalles pour des évanouissements dus à la pluie [Vogel et autres, 1993]**

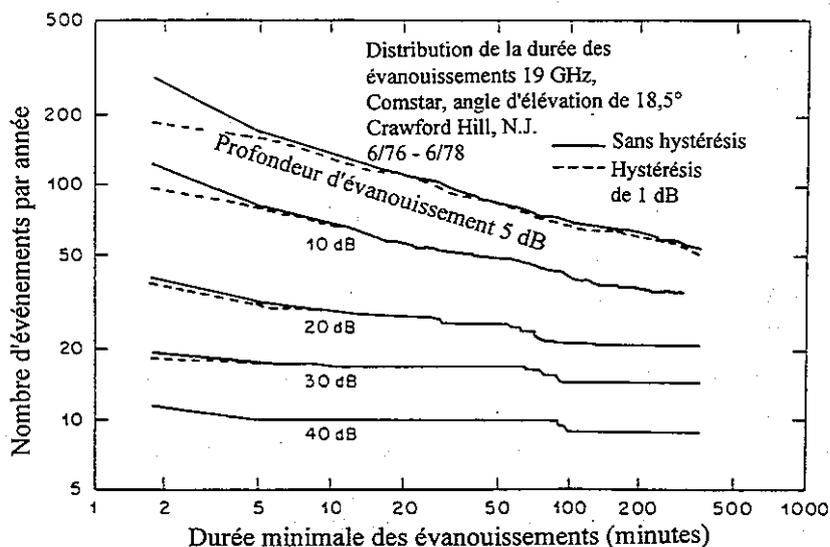


FIGURE 3.16

Distribution cumulative des intervalles inter-évanouissements [Cox et Arnold, 1982]

### 3.4.3 Vitesses de variation de l'affaiblissement

Habituellement, on estime la vitesse de variation de l'affaiblissement uniquement pour des affaiblissements dus à la pluie après avoir supprimé la plupart des fluctuations du signal dues aux scintillations troposphériques. Comme dans le cas des statistiques relatives à la durée des évanouissements dus à la pluie, il apparaît que la vitesse de variation de l'affaiblissement suit une distribution log-normale, la médiane se situant environ à 0,1 dB/s. La vitesse de variation de l'affaiblissement augmente avec la fréquence d'exploitation. On constate que la pente d'allure positive (évanouissement) et la pente d'allure négative (rétablissement) suivent des distributions similaires mais il semble tout à fait clair que lorsque la vitesse des évanouissements augmente, la différence entre la pente d'évanouissement et la pente de rétablissement a tendance à augmenter, la pente d'évanouissement étant toujours plus forte. Une explication physique pourrait être que les vitesses d'évanouissement les plus rapides sont associées aux orages et que les intensités de précipitation sont plus fortes au niveau du front que dans la queue.

La Figure 3.17 représente des distributions cumulatives des vitesses de variation de l'affaiblissement ou pentes d'évanouissement obtenues à partir de mesures expérimentales faites avec une radiobalise pour une fréquence de 30 GHz et un angle d'élévation de 26,8° [Baptista et Davies, 1994]. Ces distributions correspondent à la valeur absolue de la pente qu'elle soit positive ou négative. La figure représente les distributions de trois gammes d'évanouissements. On constate que la probabilité d'avoir des vitesses de variation de l'affaiblissement plus élevées augmente avec l'affaiblissement. D'autres expériences ont fait apparaître des tendances similaires [Pratt et autres, 1993; autres expériences dont il est fait état par Baptista et Davies, 1994]. Il est possible d'estimer les pentes d'évanouissement à d'autres fréquences en utilisant les relations de similitude en fréquence de la Recommandation UIT-R P.618.

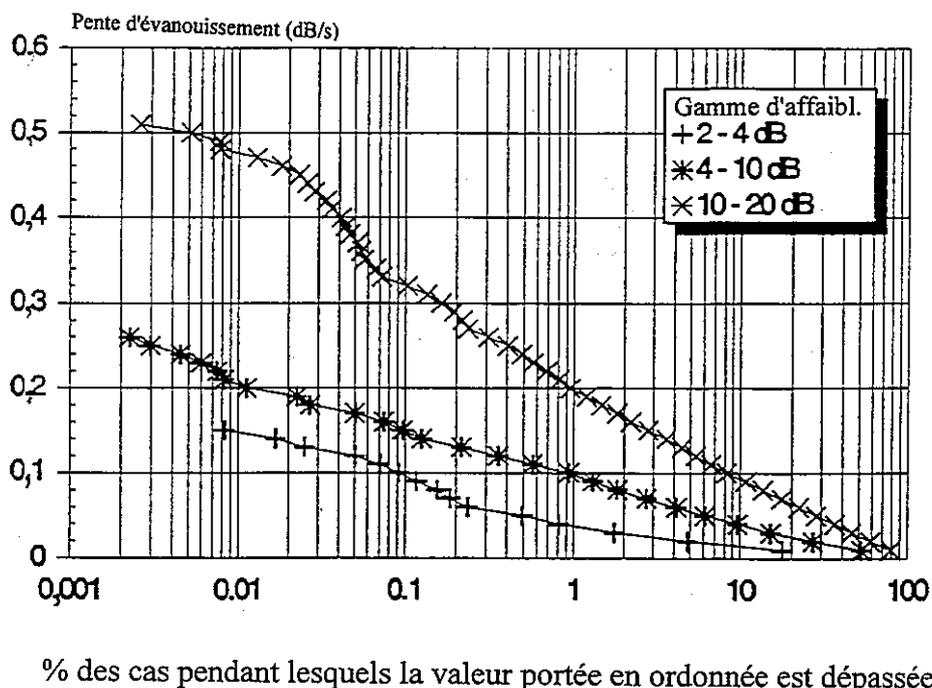


FIGURE 3.17

**Distribution cumulative des pentes d'évanouissement à 30 GHz  
[Baptista et Davies, 1994]**

**3.4.4 Corrélation entre les valeurs instantanées de l'affaiblissement à différentes fréquences**

Lorsqu'on compare les valeurs instantanées de l'affaiblissement mesurées simultanément à différentes fréquences, il ne faut pas oublier que dans la plupart des cas on observe l'effet conjugué de différents mécanismes d'affaiblissement. Pour être significative, la comparaison devrait donc se limiter à un seul d'entre eux. Dans le cas d'un évanouissement dû à la pluie, il faudrait apporter une correction pour tenir compte de l'affaiblissement par les gaz et l'absorption par les nuages. Toutefois, si la pluie est la principale cause de l'affaiblissement, les autres deviennent moins importantes au fur et à mesure que l'affaiblissement dû à la pluie augmente.

Avec ses radiobalises à 12,5, 20 et 30 GHz, le système OLYMPUS a permis de comparer des mesures simultanées d'affaiblissements instantanés. Lorsque l'on trace la courbe de l'affaiblissement  $A(f_1)$ , mesuré à la fréquence  $f_1$  de la radiobalise et celle de l'affaiblissement  $A(f_2)$  mesuré simultanément à la fréquence  $f_2$ , on observe une très forte corrélation même si l'on constate souvent une structure de type hystérésique [Ortgies et autres, 1991]. Ce phénomène a une conséquence immédiate sur la similitude en fréquence de l'affaiblissement pour les applications avec régulation de puissance sur la liaison montante pour lesquelles il serait souhaitable d'utiliser le rapport de similitude de l'affaiblissement mesuré instantanément. Les principales causes de l'effet d'hystérésis sont les variations des distributions de dimensions des gouttes et de la longueur du trajet en raison

de la pluie [Ortgies et autres, 1992], ce qui est plausible puisqu'un niveau d'affaiblissement donné peut être le résultat du produit d'un affaiblissement linéique faible et d'un trajet de propagation long ou d'un affaiblissement linéique élevé et d'un trajet de propagation court. Dans le premier cas, la pluie à l'origine de l'affaiblissement est formée de petites gouttelettes alors que dans le second les gouttes sont plus grosses. Lorsque les gouttes sont grosses, le facteur de similitude de l'affaiblissement est plus faible que lorsque les gouttes sont petites. Par conséquent, l'évolution constatée de la gradation instantanée reflète les différentes étapes d'un orage. Les statistiques relatives au facteur de gradation instantanée en fonction de la fréquence pour les bandes de fréquences des 20 et 30 GHz ont été établies sur une période de trente mois et une période d'une année respectivement à Darmstadt (Allemagne) et Virginia Tech (États-Unis) [Pratt et autres, 1993]. La forte augmentation de la gradation observée à de faibles valeurs d'affaiblissement (20 GHz) est due à l'affaiblissement par la vapeur d'eau et les nuages.

La variabilité dans le temps des phénomènes d'affaiblissement a elle aussi une répercussion immédiate sur le degré de l'affaiblissement. Pour les applications où l'on a besoin d'une très grande précision qui peut être obtenue avec une échelle constante il faudra utiliser le signal d'une autre radiobalise dont la fréquence est proche de celle à laquelle l'affaiblissement doit être traduit en échelle.

### **3.5 Effets du sable et de la poussière**

#### **3.5.1 Généralités**

L'atmosphère contient des particules solides en suspension très variées. Les dimensions de ces particules vont de 50  $\mu\text{m}$  pour les aérosols à environ 1 mm [Miller et Anthes, 1981] dans le cas de gros grains de poussière parfois appelés sable. Plus les particules sont grosses, plus vite elles tombent. Les aérosols peuvent rester en suspension pendant des jours, voire des années, mais les gros grains de poussière vont descendre rapidement vers le sol dès qu'une force par exemple un vent violent d'orage apparaît. De même, un faible mouvement ascendant suffit pour emporter les aérosols dans la stratosphère alors que les particules plus grosses, par exemple les grosses poussières, restent en général à quelques mètres au-dessus de la surface de la Terre.

Les aérosols et les petites particules solides n'ont pas d'influence significative sur la propagation des ondes électromagnétiques tant qu'on n'est pas à proximité des fréquences optiques et que leur section ne présente pas une surface trop importante. Les conséquences des fines poussières et des grosses poussières sur la transmission des ondes radioélectriques sont toutefois perceptibles à des fréquences beaucoup moins élevées même s'il est souvent difficile de dissocier leur influence de celle des phénomènes météorologiques qui accompagnent souvent les tempêtes de poussière. Dans bien des cas, les vents violents que génère une tempête de poussière peuvent dérégler le pointage des antennes, d'où un affaiblissement de la puissance du signal qu'il est difficile de distinguer de l'affaiblissement dû aux particules de poussière. Dans d'autres cas, en raison d'une plus forte humidité ou même la pluie qui peuvent accompagner une activité de convection intense dans une région aride, les particules de poussière subiront un affaiblissement plus fort qu'en présence d'une atmosphère sèche en raison de l'absorption d'eau dans la structure cristalline des particules.

#### **3.5.2 Catégories de tempêtes de poussière**

Dans une étude très poussée des effets des particules de sable et de poussière sur des signaux à 6/4 et 14/11 GHz, sur des trajets espace vers Terre [McEwan et autres, 1985] une distinction claire a été faite entre la poussière et le sable (voir le Tableau 3.1 ci-après). On notera que les particules de sable restent habituellement à moins de dix mètres de la surface de la Terre de sorte que leur

incidence sur les liaisons espace vers Terre liées aux phénomènes de propagation n'est en général pas significative pour des angles d'élévation de plus de 5°. Cette même étude a permis de recenser huit types de vents de sable et tempêtes de poussière - planétaires, cycloniques, frontaux, catabatiques, haboob, vents de constriction, tourbillons de poussière et vents diurnes - lesquels ont été classés selon plusieurs paramètres: vitesse moyenne, rafales maximales, largeur moyenne, longueur moyenne et hauteur effective. Le Tableau 3.2 récapitule ces données et la Figure 3.18 montre les principales régions désertiques dans le monde ainsi que l'emplacement et la direction du mouvement des tempêtes de sable. Dans la Figure 3.18, les zones noires foncées indiquent les principales sources de vent de sable; les zones en grisé sont les déserts; les zones délimitées par un pointillé sont des régions maritimes où il peut y avoir un brouillard dû à la poussière pendant plus de dix jours quelle que soit la saison; les flèches indiquent la direction générale des vents de sable; "C" indique les zones où soufflent les haboob; et "D" indique les zones qui ne sont pas classées comme des déserts mais dans lesquelles des tempêtes de sable peuvent survenir.

Un haboob est le résultat direct d'un orage généré par un fort courant d'air froid descendant. C'est la raison pour laquelle on parle souvent pour un haboob de tempête de sable froide. Du fait des fortes turbulences et des rafales qu'on y observe, les densités de poussière en suspension sont très élevées, ce qui réduit de façon significative la visibilité (optique). C'est la raison pour laquelle on a utilisé la visibilité optique comme paramètre pour classer les tempêtes de sable.

Le principal critère utilisé pour déterminer la manifestation d'une tempête de sable est lorsque la visibilité est inférieure à 1 km. On a pu ainsi déterminer qu'il y a entre 0,1 et 174 jours par an de tempêtes de sable dans les différentes régions du monde où l'on observe ce phénomène. Le Tableau 3.2 donne par ailleurs les visibilités types et la durée prévue de cette visibilité pour les huit types de tempêtes de sable mentionnés précédemment. La réduction de la visibilité optique étant relativement facile à mesurer, on a essayé de modéliser à partir de données correspondantes l'affaiblissement des hyperfréquences dans les tempêtes de sable.

**TABLEAU 3.1**  
**Principales distinctions entre les particules de sable et les particules de poussière**

	<b>Sable</b>	<b>Poussière</b>
Limites du diamètre	> 10 µm, généralement < 100 µm	< 10 µm
Hauteur maximale habituelle au-dessus du sol	< 10 m	> 1 000 m
Contenu en silicium	> 80%	< 55%
Contenu en oxyde de fer	~ 7%	20 - 30%
Quantité d'eau absorbée dans l'air pour une humidité relative de 91%	< 1%	6 - 9%

TABLEAU 3.2

**Classification des huit types de vents de sable et tempêtes de poussière;  
vitesse type du vent, structure, visibilité et durée  
[McEwan et autres, 1985]**

Type d'orage	Vitesse moyenne du vent (m/s)	Vitesse des rafales maximale (m/s)	Largeur (km)	Longueur (km)	Hauteur (km)	Visibilité prévue	Durée de l'événement
1) Vents planétaires	6 - 17	23	0,3 - 250	40 - 8000	0,4 - 3	10 m - < 11 km	< 24 h - 2 semaines
2) Vents cycloniques	7 - 18	27 - 50+				0 - < 1 000 m (0 - 50 m pour des orages violents)	6 - 24 h
a) courant - jet à basse altitude			500 - 1 000	500 - 2 000+	3 - 5		
b) courant - jet à haute altitude			500 - 1 000	500 - 2 000+	3 - 5		
c) Circulation de l'orage en surface			50 - 150	50 - 150	0,4 - 0,8		
3) Vents frontaux	9 - 17	38	500 - 1 000	500 - 2 000+	1 - 5	0 - < 1 000 m (0 - 50 m pour des orages violents)	1 - 8 h
4) Vents catabatiques	12 - 21	36 - 50+	15 - 150	100 - 450	1 - 5		0,5 - 18 h
5) Haboob	11 - 21,5	41	3 - 75	3 - 300	0,5 - 12	200 - 400 m (0 - 50 m pour des orages violents)	0,5 - 6 h
6) Constriction	14	18	0,5 - 10	Longueur de la vallée	Hauteur de la vallée	800 - 1 000 m (3 m pour des orages violents)	0,5 h
7) Tourbillons de poussière	5 - 10	15	0,01 - 0,5	Localisée	0,5 - 3	< 1 000 m	0,1 - 0,5 h
8) Cycle des vents diurnes	8 - 13	15	0,1 - 50	1 - 40	< 1	< 1 000 m (proche de zéro pour des orages violents)	< 1 h

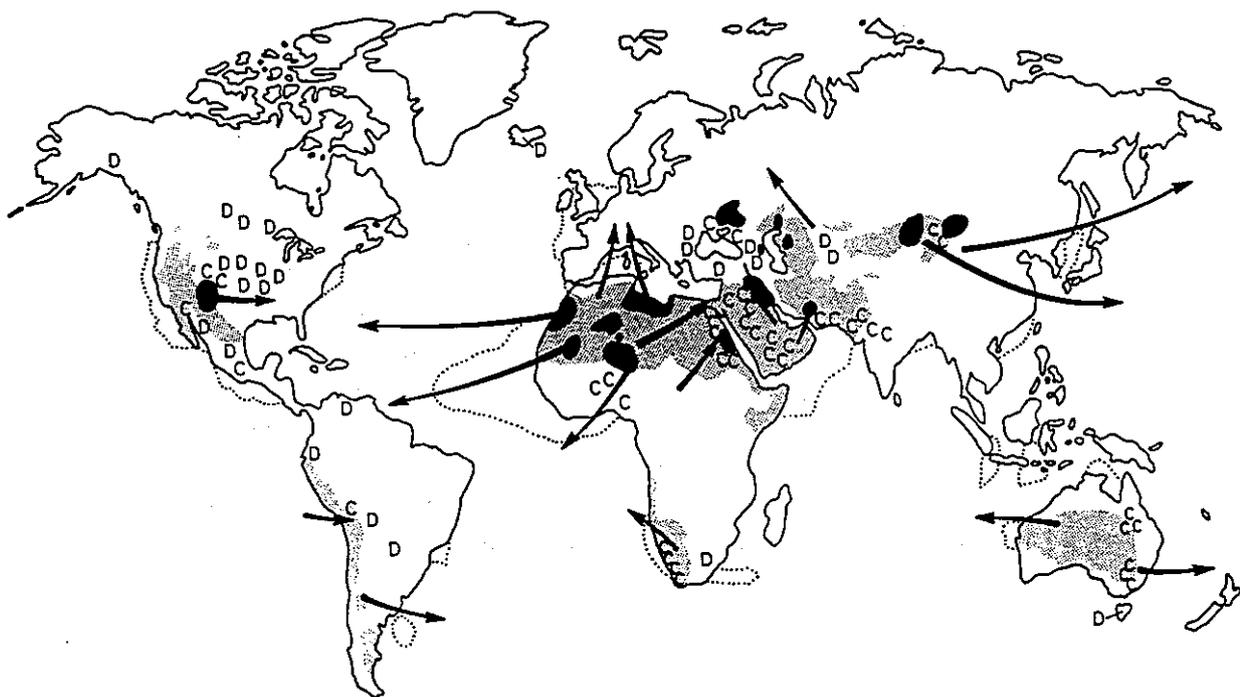


FIGURE 3.18

Sources et directions des principales tempêtes de sable [McEwan et autres, 1985]

### 3.5.3 Modèles de prévision des dégradations dues aux phénomènes de propagation pour les effets dus à la poussière

On utilise souvent la formule de Chepil et Woodruff [Chepil et Woodruff, 1957] pour établir une relation entre la masse de poussière en suspension  $\rho$  et la visibilité  $V$  (en km):

$$\rho = \frac{56 \times 10^{-9}}{V^{1,25}} \quad \text{grammes/cm}^3 \quad (3.14)$$

La visibilité est celle que l'on observe à 2 mètres au-dessus du sol. Il est possible d'établir la relation suivante entre, le nombre  $N$  de particules de poussière par  $\text{m}^3$  de rayon  $a$  (en mètres) et la visibilité  $V$  (en km) [Flock, 1987]:

$$N = \frac{5,51 \times 10^{-4}}{Va^2} \quad (3.15)$$

La densité des particules décroît avec la hauteur et, pour calculer les effets intégrés le long du trajet oblique vers le satellite, il faut, tout comme dans le cas de l'affaiblissement dû à la pluie, déterminer la longueur effective du trajet. Dans un modèle permettant de calculer cette longueur [McEwan et autres, 1986] l'hypothèse est faite qu'un orage est contenu à l'intérieur d'un cylindre de 10 km de diamètre; la poussière est uniforme dans un plan horizontal mais décroît de façon exponentielle avec la hauteur à l'intérieur du cylindre et est négligeable à l'extérieur. Si  $k_r$  et  $k_i$  sont les parties

réelle et fictive de la constante diélectrique relative complexe des particules de poussière, l'affaiblissement linéique  $\alpha_p$  est donné par la formule suivante [Flock, 1987]:

$$\alpha_p = \frac{189a}{V\lambda} \left( \frac{3k_i}{(k_r + 2)^2 + k_i^2} \right) \quad \text{dB/km} \quad (3.16)$$

où  $\lambda$  est la longueur d'onde en mètres. Dans les équations de  $N$  et  $\alpha_p$  on suppose que les particules de poussière ont un rayon uniforme. Il est peu probable que ce soit le cas et, qui plus est, l'orientation des particules sera différente. Ce défaut de symétrie peut avoir une influence importante sur la dépolarisation induite par un ensemble de particules de poussière. Il ressort de mesures d'excentricité des particules de poussière [McEwan et autres, 1983; Ghobrial et Sharief, 1987] que la valeur moyenne du rapport du petit axe horizontal au grand axe horizontal est de 0,71 et que celles du rapport du petit axe vertical au grand axe vertical sont de 0,57 [McEwan et autres, 1983] et de 0,53 [Ghobrial et Sharief, 1987]. Cette excentricité à laquelle s'ajoute l'alignement positif net probable des cristaux en raison des forces aérodynamiques [McEwan et autres, 1983] et des forces électriques [Ghobrial et Sharief, 1987] fait que, dans certains cas, les effets de la dépolarisation sont importants en particulier sur des trajets caractérisés par un petit angle d'élévation.

### 3.5.4 Résultats types des prévisions des dégradations dues à la propagation

Le Tableau 3.3 (voir la Figure 16 de [Abdulla et autres, 1986]) et le Tableau 3.4 (voir la Figure 1 de [McEwan et autres, 1986]) donnent quelques résultats types des prévisions de l'affaiblissement et de la dépolarisation. Dans le Tableau 3.3, on suppose que les particules de poussière circulaires sont uniformément réparties. Dans le Tableau 3.4 on prend pour hypothèse les excentricités dont on a déjà parlé pour les particules de poussière et on suppose qu'il y a un parfait alignement entre les particules et les azimuts équiprobables. L'humidité est de 0% et la hauteur d'antenne est de 20 m.

TABLEAU 3.3

**Affaiblissement linéique en dB/km pour une visibilité de 10 m à la fréquence donnée**

Fréquence:	1 GHz		3 GHz		10 GHz		30 GHz	
g H <sub>2</sub> O/g sol:	0,3%	10%	0,3%	10%	0,3%	10%	0,3%	10%
Affaiblissement linéique:	0,001	0,004	0,003	0,02	0,01	0,07	0,03	0,6

TABLEAU 3.4

**Découplage de polarisation à une fréquence de 14 GHz**

Angle d'élévation:	5°	10°	20°	30°
Visibilité 10 m:	22	25	31	36
Visibilité 5 m:	16	17	26	30
Visibilité 2 m:	10	14	20	24

Il ressort du Tableau 3.3 que pour une longueur de trajet équivalente de 3 km, ce n'est pas avant les fréquences de la bande Ka (30/20 GHz) que l'affaiblissement devient significatif et, même dans ce cas, ce n'est que dans un air relativement humide, avec une absorption d'eau de 10%, que l'affaiblissement observé sur le trajet approche 2 dB. Pour la dépolarisation, les valeurs du découplage de polarisation (XPD) sont relativement faibles jusqu'à ce que la visibilité soit très réduite (2 m) et lorsque l'angle d'élévation est faible. Toutefois, si l'air se charge en humidité et si les particules de poussière absorbent cette humidité, les valeurs de XPD chutent d'environ 5 dB. Sur certains trajets (angle d'élévation inférieur à 10°) et à certaines fréquences (>10 GHz) une violente tempête de poussière contenant une grosse quantité de particules humides pourrait faire chuter la valeur de XPD en dessous de 12 dB, valeur couramment utilisée comme seuil au-dessous duquel les risques de brouillage pourraient poser problème. Toutefois, les dégradations que subit la propagation des ondes radioélectriques sur les trajets espace vers Terre en raison des tempêtes de sable et de poussière sont en général beaucoup moins graves que les difficultés mécaniques que ces tempêtes peuvent engendrer, par exemple de forte rafales de vent et de poussière s'abattant sur les réseaux d'alimentation des antennes et les équipements auxiliaires.

### RÉFÉRENCES POUR LE CHAPITRE 3

- ABDULLA, S.A.A., AL-RIZZO, H.M. et CYRIL, M.M. [1986] Particle-size distribution of Iraqi sand and dust storms and their influence on microwave communications systems, *IEEE Trans.*, AP-36, 114-126.
- ACAMPORA, A.S. [1981] Rain margin improvement using resource sharing in 12 GHz satellite downlink, *Bell System Tech. Journal*, Vol. 60, 167-192.
- ALLNUTT, J.E. [1977] Variation of attenuation and space diversity with elevation angle on 12 GHz satellite-to-ground paths, *Electron. Lett.*, Vol. 13, 346-347.
- ALLNUTT, J.E. [1978] Nature of space diversity in microwave communications via geostationary satellites: a review, *Proc. IEE*, Vol. 125, 369-376.
- ALLNUTT, J.E. [1989] *Satellite-to-Ground Radiowave Propagation*, Peter Peregrinus, IEE, Londres.
- ALLNUTT, J.E. [1993] INTELSAT propagation experiments: the focus and results of recent campaigns, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 81, No. 6, 856-864.
- ALLNUTT, J.E. et SHUTIE, P.F. [1977] Slant-path attenuation and space-diversity results at 30 GHz using radiometer and satellite receivers, *Proceedings of ATS-6 Meeting*, ESTEC, Noordwijk, 6-7 septembre 1977 (ESA SP-131).
- ALTMAN, F.J. et SICHAKE, W. [1956] Simplified diversity communications system for beyond-the-horizon links, *IRE Trans.*, Vol. CS-4, 50-55.
- BAPTISTA, J.P.V. et DAVIES, P.G., éditeurs [1994] *Reference Book on Attenuation Measurement and Prediction: OPEX Second Workshop of the Olympus Propagation Experiments*, European Space Agency, ESA WPP-083.
- BARBALISCIA, F., BRUSSAARD, G., PARABONI, A. et RAVAIOLI, G. [1988a] Spatial statistical dependence of rainy events, *URSI-IEEE Symposium*, Syracuse, États-Unis d'Amérique.
- BARBALISCIA, F. et PARABONI, A. [1982] Joint statistics of rain intensity in eight Italian locations for satellite communications networks, *Electron. Lett.*, Vol. 18, 118-119.
- BARBALISCIA, F., PARABONI, A. et RAVAIOLI, G. [1988b] Fading correlation study: Final Report - *ESA Contrato No. 6825/86/NL/DG*, Fondazione Ugo Bordoni 1A1188, Italie.
- BARBALISCIA, F., PARABONI, A. et RAVAIOLI, G. [1989] Analysis and modelling of rain correlation over wide areas, *URSI Commission F Open Symposium*, La Londe Les Maures, France.
- BOITHIAS, L. [1989] Frequency scaling for rain attenuation. *Ann. des Télécomm.*, Vol. 44, 5-6, 186-198.
- BRUSSAARD, G. [1981] Prediction of attenuation due to rainfall on Earth-space links. *Radio Science*, Vol. 16, 5, 745-760.
- BRYANT, D.L. [1992] Low elevation angle 11 GHz beacon measurements at Goonhilly earth station, *BT Technology*, Vol. 10, No. 4, 68-75.

- CAPSONI, C. et MATRICCIANI, E. [1984] Performance of orbital diversity systems and comparisons with site diversity in Earth-space radio links affected by rain attenuation, *AIAA 10th. Communications Satellite Conference*, Orlando, Floride, États-Unis d'Amérique, paper AIAA 84-0723, 565-570.
- CHEPIL, W.S. et WOODRUFF, N.P. [1957] Sedimentary characteristics of dust storms: 2. Visibility and dust concentration, *Am. J Science*, 255, 104-114.
- COX, D.C. et ARNOLD, H.W. [1982] Results from the 19- and 28-GHz COMSTAR Satellite Propagation Experiments at Crawford Hill, *Proc. IEEE*, Vol. 70, 458-488.
- CRANE, R.K. [1980] Prediction of attenuation by rain. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. COM-28, 9, 1717-1733.
- DINTELMANN, F., ORTGIES, G., SZUPPA, S. et TROMMER, H. [1993] Fade duration and site diversity statistics to assess low-margin system performance at 30 GHz, XXIVe Assemblée générale de l'URSI, Kyoto.
- DISSANAYAKE, A.W., MCCARTHY, D.K., ALLNUTT, J.E., SHEPHERD, R. et ARBESSER-RASTBURG, B. [1990] 11.6 GHz Rain Attenuation Measurements in Peru, *Intl. Jnl. Satellite Comm.*, Vol. 8, 229-238.
- FEDI, F. [1979] Attenuation due to rain on a terrestrial path. *Alta Frequenza*, Vol. 66, 167-184.
- FEDI, F. [1980] Rain attenuation on Earth-satellite links: a prediction method based on point rainfall intensity. *Proc. URSI (Commission F) International Symposium on Effects of the lower atmosphere on radio propagation at frequencies above 1 GHz*, Lennoxville, Canada.
- FEDI, F. [1981a] Predicting of attenuation due to rainfall on terrestrial links. *Radio Science*, Vol. 16, 5, 731-743.
- FEDI, F. [1981b] A simple method for predicting rain attenuation statistics on terrestrial and Earth-space paths. *Fondazione Ugo Bordonì*, Rapport 1B1 081.
- FEDI, F. et PARABONI, A. [1986] A new prediction method for attenuation beyond 10 GHz based on a model of raincells characterized by exponential shape. statistics on terrestrial and Earth-space paths. *Proc. URSI -F*, Durham, États-Unis d'Amérique.
- FLAVIN, R.K. [1982] Rain attenuation considerations for satellite paths in Australia. *Australian Telecom. Research*, Vol. 16, 2, 11-24.
- FLOCK, W.L. [1987] *Propagation effects on satellite systems at frequencies below 10 GHz: A handbook for satellite system design*. NASA Reference Publication 1108(2), 2ème édition.
- FURGUSSON, A. et ROGERS, R.R. [1978] Joint statistics of rain attenuation on terrestrial and Earth-space propagation paths, *Radio Science*, Vol. 13, 471-479.
- GARCIA-LOPEZ, J.A., HERNANDO, J.M. et SELGA, J.M. [1989] Simple rain attenuation prediction method for satellite radio links. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, Vol. 36, 3, 444-448.
- GHOBRIAL, S.I. et SHARIEF, S.M. [1987] 'Microwave attenuation and cross-polarization in dust storms', *IEEE Trans.*, Vol. AP-35, 418-425.

- GOLDHIRSH, J. [1976] Earth-space path attenuation statistics influenced by orientation of rain cells, *Proc. 17th. Conf. on Radar Meteorology*, Seattle, Washington, États-Unis d'Amérique. (American Meteorological Society), 85-90.
- GOLDHIRSH, J. et ROBISON, F.L. [1975] Attenuation and space diversity statistics calculated from radar reflectivity data of rain, *IEEE Trans.*, Vol. AP-23, 221-227.
- GRAY, D.A. [1973] Earth-space path diversity: dependence on baseline orientation, *IEEE G-AP Int. Symp.*, Université de Colorado, Boulder, Colorado, États-Unis d'Amérique, 366-369.
- GUTTEBURG, O. [1983] Measurements of atmospheric effects on satellite links at very low elevation angles, *AGARD EPP Symposium on Characteristics of the lower atmosphere influencing radiowave propagation*, Spatind, Norvège, 5-1 à 5-19.
- HALL, J.E. et ALLNUTT, J.E. [1975] Results of site diversity tests applicable to 12 GHz satellite communications, *IEE Conf. Publ. 126*, 156-162.
- HARROLD, T.W. et AUSTIN, P.M. [1974] The structure of precipitation systems - a review, *J. Recherches Atmos.*, Vol. 8, 41-57.
- HODGE, D.B. [1973] The characteristics of millimeter wavelength satellite-to-ground space-diversity links, *IEE Conf. Publ. 98*, 28-32.
- HODGE, D.B. [1974] Path diversity for reception of satellite signals, *J. Recherches Atmos.*, Vol. 8, 443-449.
- HODGE, D.B. [1976] An empirical relationship for path diversity gain, *IEEE Trans.*, Vol. AP-24, 250-251.
- HODGE, D.B. [1978] Path diversity for Earth-space communications links, *Radio Science*, Vol. 13, 481-487.
- HODGE, D.B. [1982] An improved model of diversity gain on Earth-space paths, *Radio Science*, Vol. 17, 1393-1399.
- HODGE, D.B., THEOBALD, D.M. et TAYLOR, D.M. [1976] ATS-6 millimeter wavelength propagation experiment, *Report 3863-6*, ElectroScience Laboratory, Ohio State University, Columbus, Ohio, États-Unis d'Amérique.
- HOGG, D.C. [1967] Path diversity in propagation of millimeter waves through rain, *IEEE Trans.*, Vol. AP-15, 410-415.
- HOGG, D.C. et CHU, T.S. [1975] The role of rain in satellite communications, *Proc. IEEE*, 1308-1331.
- IPPOLITO, L.J., KAUL, R.D. et WALLACE, R.G. [1983] Propagation effects handbook for satellite systems design, *NASA Ref. Publ. 1082(03)*, NASA, Washington, D.C., États-Unis d'Amérique.
- KALININ, A.I. [1976] Vliyanie dozhdya na oslableniye radiovoln na trassakh zemlya - ISZ. (Earth-to-space path attenuation due to rainfall). *Elektrosviaz*, 5.
- KARASAWA, Y. et MATSUDO, T. [1991] Characteristics of fading on low-elevation angle Earth-space paths with concurrent rain attenuation and scintillation, *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, Vol. AP-39, 5, 657-661.

- KUMAR, P.N. [1985] Fade Duration Statistics from COMSTAR 20/30 GHz Beacon Measurement Program, *COMSAT Tech. Review*, Vol. 15, 71-87.
- LEITÃO, M.J. et WATSON, P.A. [1986] Method for prediction of attenuation on Earth-space links based on radar measurements of the physical structure of rainfall. *IEE Proc.*, Vol. 133, 4, 429-440.
- LI, H.J., ZHANG, C.Q., LIAO, L. et ZHANG, G.F. [1987] An improved model for the prediction of rain attenuation statistics. *Proceedings of ICAP 1987*, 226-229.
- LIN, S.H. [1980] Rain attenuation on Earth satellite paths. Summary of 10-year experiments and studies. *BSTJ*, Vol. 59, 2, 183-228.
- LIN, S.H., BERGMANN, H.J. et PARSLEY, M.V. [1980] Rain attenuation on Earth-satellite paths - Summary of 10-year experiments and studies, *BSTJ*, Vol. 59, 183-228.
- MACKENZIE, E.C. et ALLNUTT, J.E. [1977] Effect of squall-line direction on space-diversity improvement obtainable with millimetre-wave satellite radio communications systems, *Electron. Lett.*, Vol. 13, 571-573.
- MAGGIORI, D. [1981] Computed transmission through rain in the 1-400 GHz frequency range for spherical and elliptical drops and any polarization, *Alta Frequenza*, Vol. L, 5, 262-273.
- MANABE, T., IHARA, T., AWAKA, J. et FURUHAMA, Y. [1987] The relationship of raindrop-size distribution to attenuation experienced at 50, 80, 140 and 240 GHz. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, Vol. AP-35, 11, 1326-1330.
- MANGULIS, V. [1985] Protection of Ka-band satellite channels against rain fading by spare channels at a lower frequency, *Space Communications & Broadcasting*, Vol. 3, 151-158.
- MASS, J. [1979] Diversity and baseline orientations, *IEEE Trans.*, Vol. AP-27, 27-30.
- MCEWAN, N.J. et BASHIR, S.O. [1983] Microwave propagation in sand and dust storms: the theoretical basis for particle alignment. *International Conference on Antennas and Propagation*, ICAP 83, IEE Conf. Publ. 219, 40-44.
- MCEWAN, N.J., BASHIR, S.O., CONNOLLY, C. et EXCELL, D. [1985] *The effects of sand and dust particles on 6/4 and 14/11 GHz signals on satellite to Earth paths*. Final report to INTELSAT under contract INTEL-349, School of Electrical and Electronic Engineering, University of Bradford, Bradford, West Yorkshire, BD7 1DP, Angleterre.
- MCEWAN, N.J., CONNOLLY, C., EXCELL, D. et BASHIR, S.O. [1986] Attenuation, cross-polarization, and refraction in dust storms. Paper VIII-3, URSI Commission F Open Symposium, University of New Hampshire, Durham NH, États-Unis d'Amérique.
- MILLER, A. et ANTHES, R.A. [1981] *Meteorology*, Charles E. Merrill Publishing Co., 4ème édition.
- MIMIS, V. et SMALLEY, A. [1982] Low elevation angle site diversity satellite communications for the Canadian Arctic, *IEEE Int. Conf. on Communications*, 4A.4.1-4A.4.5.
- MISME, P. et WALDTEUFEL, P. [1980] Calcul des affaiblissements par les précipitations sur un trajet Terre-satellite. *Proc. URSI (Commission F) International Symposium on Effects of the lower atmosphere on radio propagation at frequencies above 1 GHz*, Lennoxville, Canada.

- MISME, P. et WALDTEUFEL, P. [1982] Affaiblissements calculés pour des liaisons Terre-satellite en France, *Ann. Télécommun.*, Vol. 37, 325-333.
- MORITA, K. et HIGUTI, I. [1978] Statistical studies on rain attenuation and site diversity effect on Earth to satellite links in microwave and millimeter wavebands. *Trans. Inst. Electron. Comm. Engrs. Japon*, E61, 425-432.
- OLSEN, R.L., ROGERS, D.V. et HODGE, D.B. [1978] The  $aR^b$  relation in the calculation of rain attenuation. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 26, 2, 318-329.
- ORTGIES *et autres* [1992] *Proceedings of the NAPEX VI and ACTS miniworkshop*, 142-154.
- ORTGIES, G., DINTELMANN, F. et RÜCKER, F., [1991] Aspects of attenuation frequency scaling, *North American Radio Science Meeting and International IEEE/AP Symposium*, Londres, Canada.
- OTSU, Y., KOBAYASHI, T., SHINOZUKO, T., IHARA, T. et AOYAMA, S. [1978] Measurement of rain attenuation at 35 GHz along the slant paths over two sites with a height difference of 3 km, *J. Radio Research Labs. (Japon)*, Vol. 25, 1-21.
- PARABONI, A. et RIVA, C. [1994] A New Method for the Prediction of Fade Duration Statistics in Satellite Links Above 10 GHz, *Intl. Jnl. Satellite Comm.*, Vol. 12, 387-394.
- PRATT, T, STUTZMAN, W.L., SAFAAI-JAZI, A., REMAKLUS, P.W., LASTER, J., NELSON, B. et AJAZ, H. [1993] Fade duration statistics from the Virginia Tech propagation experiment using the Olympus satellite 12, 20 and 30 GHz beacons. *Proceedings of OPEX XX*, 224-256, Darmstadt, Allemagne.
- ROGERS, D.V. [1981] Diversity and single-site radiometric measurements of 12 GHz rain attenuation in different climates, *IEE Conf. Publ. 195*, 118-123.
- ROGERS, D.V. et ALLNUTT, J.E. [1984] Evaluation of a site diversity model for satellite communications systems, *IEEE Proc. F*, Vol. 131, 501-506.
- ROGERS, R.R. [1976] Statistical rainstorm models: their theoretical and physical foundations, *IEEE Trans.*, Vol. AP-24, 547-566.
- RUCKER, F. [1980] Simultaneous propagation measurements in the 12 GHz band on the SIRIO and OTS satellite links, *URSI Commission F Open Symposium*, Lennoxville, PQ, Canada, 4.1.1-4.2.5.
- RUE, O. [1985] Influence of the atmosphere on Earth-to-satellite links at frequencies above 10 GHz, *TELE*, Vol. 2, (Édition anglaise, Suède).
- RUE, O. [1988] The statistical dependence of rain height on rain rate, and its use in rain attenuation prediction. *Swedish Telecom Radio*, Rapport R1 01/88.
- STRICKLAND, J.I. [1977] Radiometric measurement of site diversity improvement at two Canadian locations, *URSI Commission F Open Symposium*, La Baule, France (contribution tardive).
- SZUPPA, S., HEYER, G. et TROMMER, H. [1993] Vergleich einjähriger 30-GHz-Radiometermessungen mit gleichzeitigen Regenintensitätsmessungen für den Großraum Berlin, *Kleinheubacher Berichte* 36, 701-705.

- TOWNER, G.C., BOSTIAN, C.W., STUTZMAN, W.L. et PRATT, T. [1984] Instantaneous diversity gain in 10-30 GHz satellite systems, *IEEE Trans.*, Vol. AP-32, 206-208.
- TOWNER, G.C., MARSHALL, R.E., STUTZMAN, W.L., BOSTIAN, C.W., PRATT, T., MANUS, E.A. et WILEY, P.H. [1982] Initial results from the VPI&SU SIRIO diversity experiment, *Radio Science*, Vol. 17, 1489-1494.
- V HUGO, D. et WILDE, A. [1994] An adaptive resource sharing strategy for TDMA, *International Journal of Satellite Communications*, Vol. 12, 249-256.
- VOGEL, W.J., TORRENCE, G.W. et ALLNUTT, J.E. [1993] Rain Fades on Low Elevation Angle Earth-Satellite Paths: Comparative Assessment of the Austin, Texas, 11.2 GHz Experiment, *Proc. IEEE*, Vol. 81, 885-896.
- WALLACE, R.G. et CARR, J.R. [1982] Site diversity system operation study - Final Report, *Tech. Report 2130*, ORI Inc., Silver Spring, Maryland, États-Unis d'Amérique.
- WARREN, S.G. *et autres* [1986] Global distribution of total cloud cover and cloud type amounts over land, National Center for Atmospheric Research (NCAR) Technical Notes, *NCARTN-273*, octobre.
- WILSON, R.W. et MAMMEL, W.L. [1973] Results from a three-radiometer path-diversity experiment, *IEE Conf. Publ.* 98, 23-27.
- WITTERNIGG, N., RANDEU, W.L., RIEDLER, W. et KUBISTA, E. [1987] 3-years analysis report (1980-1983), Final Report of INTELSAT contract IS-900: 12 GHz quadruple-site radiometer diversity experiment, Institut für Angewandte Systemtechnik in der Forschungsgesellschaft, Inffeldgasse 12, A-8010 Graz, Autriche.
- WITTERNIGG, N., RANDEU, W.L., RIEDLER, W., KUBISTA, E., ARBESSER-RASTBURG, B. et ALLNUTT, J.E. [1993] Quadruple site diversity in Austria using 12 GHz radiometers, *IEE Proceedings-H*.
- YAMADA, M., KARASAWA, Y., YASUNAGA, M. et ARBESSER-RASTBURG, B. [1987] An improved prediction method for rain attenuation in satellite communications operating at 10-20 GHz. *Radio Science*, Vol. 22, 1053-1062.
- ZAKHARYAN, M.V., KORNILOV, L.N. et POZHIDAEV, V.N. [1989] Izmereniya raspredelenii dozhdevykh kapel po razmeram i otsenka koeffitsientov oslableniya radiovoln. (Measurement of raindrop size distributions and evaluation of attenuation coefficients). *Radiotekhnika i elektronika*, 8.

## CHAPITRE 4

### INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE DE BRUIT DU CIEL

Le bruit radioélectrique émis par toute matière est une source d'information utilisée en radioastronomie et en télédétection mais peut limiter la qualité des services de télécommunication. Les sources de bruit radioélectrique prises en considération sur les trajets Terre-espace sont l'atmosphère, les nuages, la pluie, les sources extraterrestres et le bruit provenant de la surface de la Terre. Les méthodes de prévision sont celles données dans la Recommandation UIT-R P.372. On trouvera des informations de base sur le bruit radioélectrique et les sources galactiques dans [Kraus, 1966].

#### 4.1 Influence de la température de bruit de l'atmosphère sur les trajets Terre-espace

La température de bruit d'une antenne embarquée à bord d'un satellite est due essentiellement à la température de bruit élevée rayonnée par la Terre qui remplit ou presque le faisceau principal de l'antenne. Le bruit supplémentaire imputable aux précipitations ou à d'autres variables est négligeable dans ce cas [Allnutt, 1989]. Pour un faisceau à couverture mondiale, la température de bruit dépend de la fréquence et de la position du satellite par rapport aux grandes masses terrestres de la planète. La Figure 9 de la Recommandation UIT-R P.372 illustre cette dépendance.

L'antenne de la station au sol est quant à elle pointée vers le ciel relativement frais; la présence de nuages et de pluie peut donc faire augmenter sensiblement sa température de bruit. En général, la température de bruit d'une antenne est donnée par la formule:

$$T_s = T_m(1 - 10^{-A/10}) + T_g \times 10^{-A/10} \quad \text{K} \quad (4.1)$$

où  $T_s$  est la température de bruit du ciel perçue depuis l'antenne,  $T_m$  est la température effective du milieu d'affaiblissement (atmosphère, nuages, pluie),  $A$  est l'affaiblissement total dû au milieu et  $T_g$  est la température des sources radioélectriques extraterrestres auxquelles s'ajoute le bruit galactique de fond (environ 3 K au-dessus de 3 GHz). (L'équation est donnée aux § 3-15 et 3-16 de [Kraus, 1966].) Dans la plupart des cas, pour les systèmes à satellites en exploitation, on peut ignorer le bruit extraterrestre (à moins que le soleil ou la lune ne se trouve dans le faisceau de l'antenne); l'équation se ramène alors à l'équation (52) de la Recommandation UIT-R P.618.

L'influence de la pluie sur une liaison descendante de satellite ne se limite pas à l'affaiblissement; le rapport  $C/N$  décroît car la température de bruit est plus élevée lorsqu'il pleut que par temps clair. Dans certains cas, l'augmentation de la température de bruit peut avoir une influence plus grande sur la liaison que l'affaiblissement lui-même [Pratt et Bostian, 1986].

#### 4.2 Bruit galactique et autres sources de bruit extraterrestres

Le bruit émis par des sources extraterrestres - en particulier le soleil, la lune - et le bruit de fond galactique sont bien connus et il est possible de calculer l'influence de ces sources sur la température de bruit totale d'un système à l'aide de la méthode exposée au § 6 de la Recommandation UIT-R P.372. La température de brillance du soleil décroît au fur et à mesure que la fréquence augmente, passant d'environ  $10^6$  à 30 MHz à  $10^4$  à 10 GHz en période de calme. A 20 GHz, pour une antenne de 2 mètres de diamètre (ouverture de faisceau d'environ  $0,5^\circ$ )

l'augmentation de la température de bruit serait d'environ 8 100 K lorsque le soleil est calme [Ippolito, 1989]. Le soleil et la lune sous-tendent chacun un angle d'environ  $0,5^\circ$  de sorte que si le faisceau de l'antenne est beaucoup plus large, l'influence du soleil ou de la lune est pondérée par l'existence d'une partie importante de ciel relativement froid.

### 4.3 Bruit à la surface de la Terre et bruits artificiels

Les antennes de stations terriennes fixes pour satellites en orbite géostationnaire sont en général conçues et situées de façon à ce qu'il n'y ait pas d'intersection entre le lobe principal et le terrain local ou des obstacles tels que des montagnes ou de gros bâtiments. Les lobes latéraux sont eux aussi minimisés de façon à réduire l'influence de la température de la Terre sur la qualité de fonctionnement des systèmes, mais il se peut qu'avec des systèmes terrestres mobiles à satellites, le faisceau de l'antenne passe à travers la végétation ou soit obstrué par des bâtiments ou le terrain. Des mesures [Estabrook et autres, 1990] font apparaître que l'incidence du bruit supplémentaire est la plus forte lorsque la température de bruit interne de l'antenne est faible, ce qui est le cas pour une antenne moins directive. Les obstacles feront certes augmenter la température de bruit perçue depuis l'antenne mais ils causeront également un effet d'écran ou un phénomène de propagation par trajets multiples qui auront vraisemblablement une plus grande influence sur la qualité de fonctionnement totale de la liaison; voir le Chapitre 8.

Le bruit artificiel est la principale cause de l'affaiblissement dans les bandes des ondes métriques et décimétriques dans toutes les zones à l'exception des zones rurales très calmes. À la différence des autres sources de bruit, il y a une influence de la polarisation en ce sens que la composante verticale est plus élevée que la composante horizontale [Hall, 1979]. En général, le niveau médian du bruit décroît de façon linéaire selon une fonction  $\log(f)$ . On observe des variations importantes en fonction du lieu et du temps et on dispose de peu de données pour élaborer des modèles permettant de prévoir les niveaux.

### 4.4 Problème pris à titre d'exemple

Sur une liaison descendante à 20 GHz, l'affaiblissement dépassé pendant 0,01% du temps est de 7 dB. Si la température de la pluie est de 260 K et si l'on ne tient pas compte du bruit galactique, la température de bruit du ciel telle qu'elle est perçue depuis l'antenne est, à partir de l'équation (4.1), donnée par la formule:

$$T_s = 260 (1 - 10^{-7/10}) = 208 \quad \text{K}$$

Si la température de bruit  $T_r$  du système de réception par atmosphère claire est de 250 K, l'augmentation de la température de bruit est de:

$$10\log\left(\frac{T_s + T_r}{T_r}\right) = 10\log\left(\frac{208 + 250}{250}\right) = 2,6 \quad \text{dB}$$

de sorte que la marge du système doit tenir compte de l'affaiblissement et de l'augmentation du bruit: 9,6 dB.

RÉFÉRENCES POUR LE CHAPITRE 4

- ALLNUTT, J.E. [1989] *Satellite-to-ground radiowave propagation*, Peter Peregrinus Press, IEE, Londres.
- ESTABROOK, P., OLIVER, G., JAMNEJAD, V., HUANG, J. et THOMAS, B. [1990] The impact of external noise sources on antenna noise temperature and the characterization of the antennas used in the joint MSAT-X/AUSSAT experiment, *MSAT-X Quarterly*, N° 22, JPL 410-13-22.
- HALL, M.P.M. [1989] *Effects of the Troposphere on Radio Communication*, Peter Peregrinus Press, IEE, Londres.
- IPPOLITO, L.J. [1989] Propagation effects handbook for satellite systems design, *NASA Ref. Publ. 1082(04)*, NASA Washington, DC, États-Unis d'Amérique.
- KRAUS, J.D. [1966] *Radio Astronomy*, McGraw-Hill Book Co., New York, NY, États-Unis.
- PRATT, T. et BOSTIAN, C.W. [1986] *Satellite Communications*, John Wiley and Sons, New York, États-Unis d'Amérique.

## CHAPITRE 5

### DÉPOLARISATION SUR LE TRAJET

#### 5.1 Introduction

Dans certains systèmes de télécommunication par satellite, on utilise des signaux à double polarisation orthogonale afin d'accroître la capacité des canaux sans augmenter la largeur de bande requise. Cette technique est connue sous le nom de "réutilisation des fréquences". Toutefois, le brouillage entre les canaux, imputable à la dépolarisation des ondes sur le trajet de propagation, peut limiter les performances idéales de ces systèmes.

La dépolarisation modifie les propriétés de polarisation de l'onde incidente. Les polarisations rectiligne et circulaire sont transformées en polarisation elliptique et les axes de polarisation eux-mêmes peuvent subir une rotation [Chu, 1971; DiFonzo et autres, 1976].

Les aspects radiométéorologiques de la dépolarisation sont examinés dans le Chapitre 3 du Manuel sur la radiométéorologie de l'UIT-R. Il existe par ailleurs d'excellentes études des aspects "système" de la dépolarisation (par exemple, [Allnutt, 1989]).

#### 5.1.1 Causes physiques de la dépolarisation

On peut observer une dépolarisation (polarisation croisée) lorsque des ondes se propagent dans des milieux qui sont anisotropes (asymétriques) par rapport à la polarisation incidente. La dépolarisation sous forme de rotation de Faraday du plan de polarisation rectiligne se produit dans l'ionosphère parce que l'ionosphère est biréfringente en présence du champ magnétique de la Terre. On remédie le plus souvent aux dégradations résultantes en utilisant une polarisation circulaire aux fréquences (inférieures à 10 GHz) auxquelles ce phénomène peut être très prononcé. Les effets de la propagation ionosphérique sont examinés en détail au Chapitre 7.

La dépolarisation dans les précipitations est due à l'affaiblissement et aux déphasages différentiels qui sont induits entre les composantes orthogonales d'une onde incidente par des hydrométéores anisotropes. Les ondes à polarisation orthogonale se propageant dans un milieu qui cause uniquement un déphasage différentiel sont dépolarisées mais conservent leur configuration orthogonale; toutefois, si le milieu lui aussi induit un affaiblissement différentiel, les ondes, elles aussi, perdent leur orthogonalité [DiFonzo et autres, 1976].

#### 5.1.2 Importance de la dépolarisation du point de vue du fonctionnement des systèmes

L'importance de la dépolarisation pour un système de télécommunication dépend de plusieurs facteurs:

- la fréquence du signal,  $f$ ;
- la géométrie du trajet (c'est-à-dire l'angle d'élévation  $\theta$ , l'angle d'inclinaison  $\tau$  de la polarisation reçue);
- les facteurs climatiques locaux (par exemple l'intensité des pluies); et
- la sensibilité aux brouillages par polarisation croisée (c'est-à-dire si le système fait appel ou non à la réutilisation des fréquences).

Pour les systèmes à un seul état de polarisation, la dépolarisation engendre une petite augmentation apparente de l'affaiblissement sur le trajet mais pour les systèmes utilisant des polarisations orthogonales doubles pour accroître la capacité des canaux, le signal utile reçu dans l'un ou l'autre canal subira parfois le brouillage causé par la composante à polarisations croisées. Les satellites occupant presque la même position et utilisant des polarisations orthogonales pour accroître l'isolation entre les systèmes peuvent subir des brouillages similaires.

L'isolation des canaux peut se dégrader suffisamment parfois pour abaisser les performances et doit donc être prise en compte dans la conception des systèmes avec réutilisation des fréquences. La dépolarisation est souvent la cause la plus importante de la dégradation sur le trajet pour les systèmes à satellites fonctionnant dans les bandes des 6/4 GHz [Allnutt, 1984] et sur certains trajets de propagation elle peut limiter les performances des satellites fonctionnant à 14/11 GHz, en particulier pour des angles d'élévation faibles et dans des climats où la pluviométrie est modérée [Rogers et Allnutt, 1986]. (Le dernier cas est illustré dans les exemples de calcul au § 5.6.) Pour les fréquences supérieures ou égales à 20 GHz, les performances des systèmes sont habituellement limitées par les évanouissements, du moins pour des marges de protection contre les évanouissements allant jusqu'à 10 - 15 dB et une marge minimale de XPD opérationnelle de 15 dB.

Les techniques de limitation des dégradations numériques et adaptatives ont tendance à améliorer les performances des systèmes s'il y a réutilisation des fréquences, exception faite de la régulation de puissance sur la liaison montante, pour laquelle un accroissement important de la puissance d'émission peut être à l'origine de brouillages importants sur les liaisons voisines [McEwan et Leitao, 1982].

### **5.1.3 Isolement et découplage de polarisation**

Pour un système de télécommunication avec réutilisation des fréquences le paramètre de polarisation important est le découplage de polarisation (XPI) défini comme étant le rapport en décibels de la puissance du signal copolaire (utile) reçue dans un canal à la puissance du signal contrapolaire (brouilleur) reçue dans le même canal. Dans la pratique, il est difficile de mesurer le XPI car la composante contrapolaire ne peut être dissociée du bruit dans le canal copolaire. La grandeur habituellement mesurée dans les expériences est le découplage de polarisations croisées (XPD) défini comme étant le rapport de la puissance copolaire reçue dans un canal à la puissance contrapolaire détectée dans le canal orthogonal, les deux puissances provenant du même signal émis.

En théorie, le XPD et le XPI sont équivalents pour la plupart des situations concrètes et des mesures effectuées sur des trajets obliques avec des polarisations commutées ont confirmé cette conclusion [Cox et Arnold, 1984]. La discussion qui suit porte donc essentiellement sur la valeur mesurée, XPD.

### **5.1.4 États de polarisation**

Toute onde électromagnétique est caractérisée par un état de polarisation, le vecteur champ électrique. En général, au fur et à mesure que l'onde progresse dans le temps, l'extrémité du vecteur électrique décrit une ellipse dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation. Une ellipse de polarisation type est représentée à la Figure 5.1.

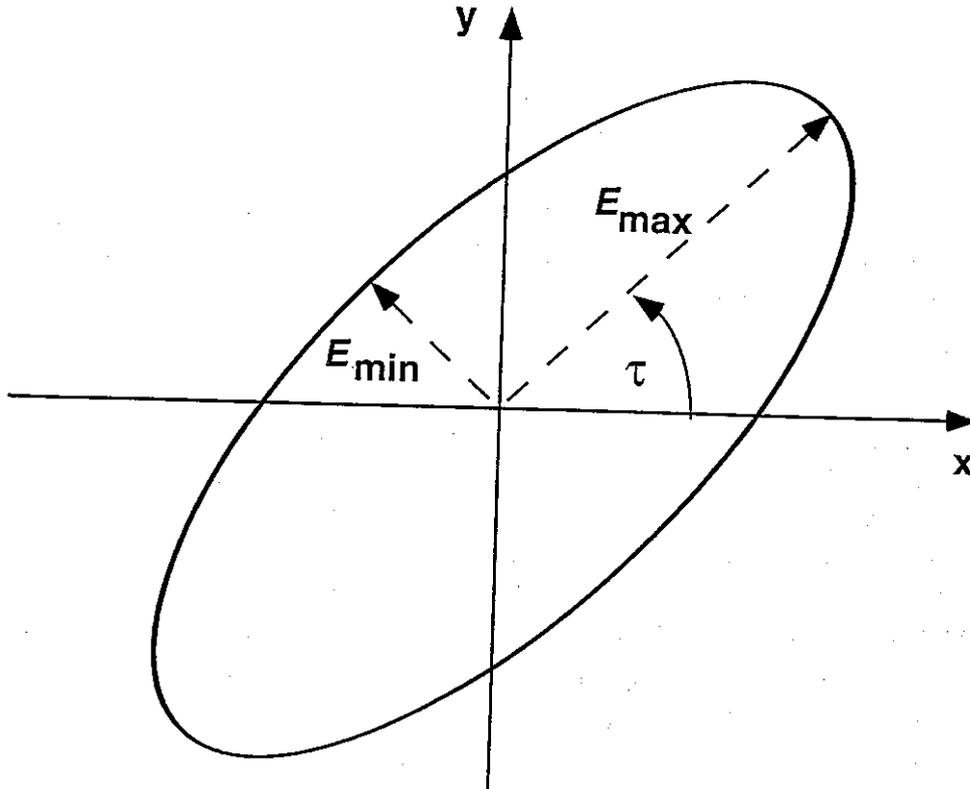


FIGURE 5.1

### Ellipse de polarisation d'une onde radioélectrique type à polarisation elliptique

L'état de polarisation d'une onde est parfaitement décrit par son ellipse de polarisation (c'est-à-dire les amplitudes du demi grand axe  $E_{max}$  et du demi petit axe  $E_{min}$ ) et le sens de rotation du vecteur (dextrogyre pour une rotation dans le sens des aiguilles d'une montre, lorsque que l'onde se propage et s'éloigne de l'observateur et lévogyre pour une rotation dans le sens inverse). Comme le montre la Figure 5.1, l'ellipse de polarisation peut être inclinée d'un angle  $\tau$  par rapport à un système de coordonnées donné (par exemple défini par l'horizontale et la verticale locales au niveau d'une station de Terre). En fait, l'onde émise par un satellite, telle qu'elle est perçue par une station terrienne, est presque toujours inclinée par rapport à l'horizontale locale au niveau du sol [voir l'équation (5.8)].

On distingue deux cas particulièrement importants pour ce qui est de l'état de polarisation:

- si  $E_{max}$  et  $E_{min}$  ont la même grandeur, on dit que la polarisation est circulaire (circulaire dextrogyre ou circulaire lévogyre selon le sens de rotation); et
- si  $E_{max}$  est différent de zéro et si  $E_{min}$  est égal à zéro, le vecteur électrique conserve une orientation constante définie par  $E_{max}$  et on dit alors que la polarisation est rectiligne.

Il est difficile de générer des états de polarisation purs avec des antennes réelles et on obtient rarement dans la pratique une polarisation véritablement circulaire ou véritablement rectiligne. Le rapport axial des tensions  $ar$  défini par la formule suivante est une mesure utile de la "pureté" de la polarisation

$$ar = \left| \frac{E_{max}}{E_{min}} \right| \quad (5.1a)$$

ou en décibels

$$AR = 20 \log \left| \frac{E_{max}}{E_{min}} \right| \text{ dB} \quad (5.1b)$$

Dans la pratique, on considère que les ondes ayant des rapports axiaux inférieurs à 1,4 environ (c'est-à-dire 3 dB) sont des ondes à polarisation "circulaire" alors que celles ayant des rapports axiaux de plus de 10 environ (c'est-à-dire 20 dB) sont classées comme des ondes à polarisation "rectiligne".

### 5.1.5 Orthogonalité et défaut de polarisation

Pour que des systèmes avec réutilisation des fréquences fonctionnent bien il faut que le couplage (diaphonie) entre les deux polarisations soit limité à un niveau minimal pendant un pourcentage de temps donné. De même, l'isolement de polarisation entre les deux signaux doit être supérieur à un seuil minimum indiqué dans les normes de qualité de fonctionnement. L'isolement entre deux états de polarisation est proportionnel au degré d'orthogonalité entre ces deux états alors que le couplage entre une antenne et une onde incidente est proportionnel au degré de similitude des états de polarisation. Toute réduction correspondante du couplage est appelée défaut de polarisation.

On peut montrer en théorie [Beckmann, 1968] que deux polarisations sont orthogonales lorsque leurs ellipses de polarisation ont le même rapport axial, leurs grands axes sont perpendiculaires l'un par rapport à l'autre et leur sens de rotation sont inverses. Les conditions idéales sont rarement réalisées dans les systèmes en exploitation mais cette définition permet d'analyser le couplage d'une onde et d'une antenne ou de la diaphonie entre signaux à double polarisation dans un système avec réutilisation des fréquences.

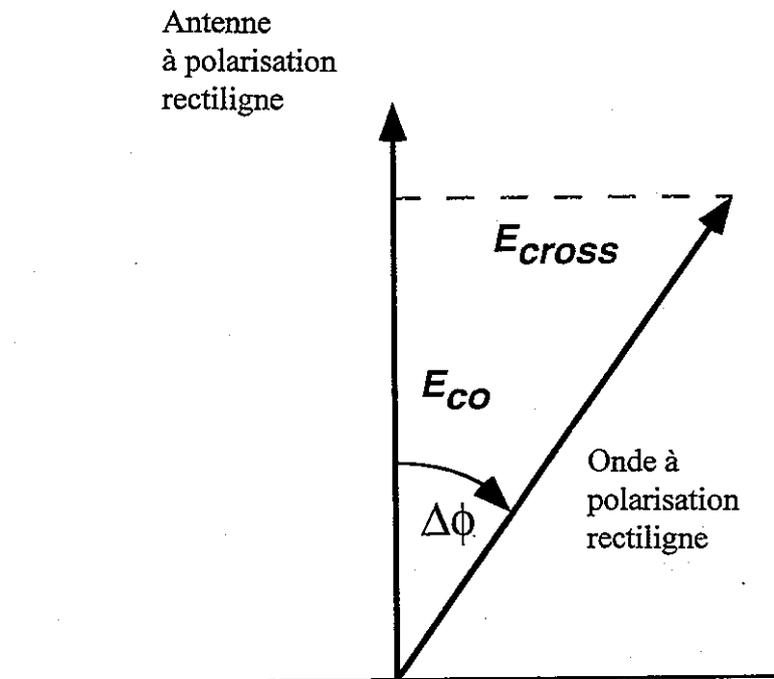


FIGURE 5.2

**Relation entre une antenne à polarisation rectiligne et une onde à polarisation rectiligne subissant une certaine rotation par rapport à la polarisation de l'antenne**

Considérons par exemple le signal à polarisation rectiligne rayonné par un dipôle. Pour détecter ce signal on utilise normalement une antenne caractérisée par la même polarisation (rectiligne). Supposons toutefois que le milieu de propagation a fait subir à la polarisation de l'onde une rotation angulaire de  $\Delta\phi$  par rapport à la polarisation de l'antenne (voir Figure 5.2). Dans ce cas le rapport (des tensions) des composantes de polarisation de l'onde par rapport à la polarisation de l'antenne s'exprime simplement par la formule:

$$\left| \frac{E_{cross}}{E_{co}} \right| = \text{tg}(\Delta\phi) \quad (5.2a)$$

$\Delta\phi$  étant l'angle entre les vecteurs de polarisation de l'onde incidente et de l'antenne de réception. Le carré du rapport des tensions donne le rapport des puissances appelé rapport de polarisations croisées (*cpr*):

$$cpr = \left| \frac{E_{cross}}{E_{co}} \right|^2 = \text{tg}^2(\Delta\phi) \quad (5.2b)$$

qui s'écrit en décibels comme suit:

$$CPR = 20 \log(\text{tg} \Delta\phi) \text{ dB} \quad (5.2c)$$

Le rapport CPR quantifie la diaphonie générée au niveau d'une antenne lorsque les axes de polarisation de l'antenne et de l'onde incidente ne sont pas alignés et séparés d'un angle  $\Delta\phi$ .

Le rapport de polarisations croisées CPR est l'inverse du découplage de polarisation (XPI) défini au § 5.1.3. Cette correspondance est appliquée au § 5.3.1 pour déterminer la dégradation observée dans l'isolement du signal en raison du défaut de polarisation de l'antenne lorsque l'ionosphère fait subir une rotation à l'onde à polarisation rectiligne (rotation de Faraday).

## 5.2 Relation entre dépolarisation et affaiblissement

Il existe des méthodes permettant de calculer les paramètres de diffusion de particules de précipitation représentatives [Oguchi, 1983]; elles peuvent être intégrées dans les modèles qui établissent une relation entre la dépolarisation et l'affaiblissement sur un trajet de propagation, du moins pour le milieu pluviométrique [Nowland et autres, 1977]. On a constaté que ces modèles étaient très utiles pour prévoir les dégradations des systèmes. Ils ne permettent pas de prendre en compte directement d'autres effets de la dépolarisation comme ceux imputables à des cristaux de glace à faible affaiblissement mais les effets peuvent en général être intégrés de façon approximative par un facteur de correction empirique.

L'affaiblissement sur le trajet est fonction essentiellement de l'affaiblissement global du milieu de propagation alors que la dépolarisation dépend de l'asymétrie globale de ce même milieu [Rogers, 1985]. La corrélation instantanée entre le XPD et l'affaiblissement sur un trajet est donc souvent faible [Ippolito, 1981] mais des expériences permettent de vérifier que cette corrélation est bonne d'un point de vue statistique du moins pour la partie de la distribution où l'affaiblissement par les précipitations (pluie) est le facteur le plus important. Avec un modèle adapté, il est donc possible d'évaluer les statistiques de XPD à partir des statistiques d'affaiblissement par la pluie mesurées ou prévues.

Les formules semi-empiriques rapportant le  $XPD$  (dB) à l'affaiblissement copolaire,  $A_p$  (dB), dépassé pendant un pourcentage  $p$  du temps sur le même trajet ont en général la forme suivante [Nowland et autres, 1977]:

$$XPD = U - V \log(A_p) \quad \text{dB} \quad (5.3)$$

On a proposé diverses formules de ce type [Olsen et Nowland, 1978; Dissanayake et autres, 1980; Chu, 1982; Stutzman et Runyon, 1984; Fukuchi et autres, 1984] pour les applications des systèmes de télécommunication. La méthode décrite dans la Recommandation UIT-R P.618 reprend les mêmes formules.

### 5.2.1 Calcul des statistiques de XPD à long terme

On estime que le modèle de XPD recommandé décrit au § 4.1 de la Recommandation UIT-R P.618 est valable pour des fréquences  $f$  comprises entre  $8 \text{ GHz} \leq f \leq 35 \text{ GHz}$  et des angles d'élévation du trajet  $\theta \leq 60^\circ$ . (On notera toutefois que l'utilisation de la méthode de prévision de l'affaiblissement exposée dans la Recommandation UIT-R P.618 n'est recommandée que pour les fréquences allant jusqu'à 30 GHz.) On trouvera au § 5.6 ci-après un exemple de calcul du XPD selon cette méthode.

La méthode de prévision de l'UIT-R a été élaborée à partir de la forme générale de l'équation (5.3) ci-dessus. D'autres termes ont été ajoutés à cette équation pour tenir compte expressément de l'influence de la fréquence, de l'angle d'élévation du trajet, de la polarisation de l'onde incidente et de la dépolarisation par les cristaux de glace sur le XPD.

#### 5.2.1.1 Dépolarisation par la glace

On observe souvent une dépolarisation par les cristaux de glace au-dessus de la région pluvieuse des orages et parfois dans des nuages sans pluie. La méthode de l'UIT-R intègre une correction empirique pour évaluer la dépolarisation par la glace.

Si on combine les expressions de la dépolarisation par la pluie et de la dépolarisation par la glace (Recommandation UIT-R P.618), l'expression équivalente de la dépolarisation nette sur le trajet s'écrit comme suit:

$$XPDP_p = XPDP_{pluie} [0,85 - 0,05 \log p] \quad \text{dB} \quad (5.4)$$

où le terme entre crochets représente les effets de la dépolarisation par la glace. L'équation (5.4) montre que, dans le modèle, la part de la glace dans le XPD net sur le trajet décroît avec le pourcentage de temps.

Pour des pourcentages de temps  $p = 1, 0,1, 0,01$  et  $0,001\%$ , le terme entre crochets prend respectivement les valeurs 0,85, 0,90, 0,95 et 1,0; ainsi, pour un pourcentage de temps de 1%, le  $XPDP_p$  net (en dB), une fois tenu compte de la dépolarisation par la glace, est égal à 85% du  $XPDP_{pluie}$ . (Par exemple, si le  $XPDP_{pluie}$  ne dépasse pas 30 dB pendant 1% du temps, le  $XPDP_p$ , une fois tenu compte de la dépolarisation par la glace, tombe à 25,5 dB.) Toutefois, pour un pourcentage de temps de 0,001%, aucune correction n'est appliquée pour tenir compte de la dépolarisation par la glace.

#### 5.2.1.2 Influence de la fréquence

Dans la Figure 5.3 on trace la courbe de la relation entre la dépolarisation par la pluie et l'affaiblissement par la pluie, obtenue selon la méthode décrite au § 4.1 de la Recommandation UIT-R P.618, pour des fréquences de 8, 12, 20 et 30 GHz en supposant une polarisation circulaire

( $\tau = 45^\circ$ ) et un angle d'élévation de  $30^\circ$  (mais en ignorant l'angle d'obliquité). Le  $XPD_{pluie}$  (et par conséquent le  $XPD_p$ ) correspondant à une valeur fixe de  $A_p$  décroît (se dégrade) au fur et à mesure que la fréquence décroît. Inversement, sur toute la gamme du modèle,  $A_p$  augmente (empire) avec la fréquence. Il faut donc évaluer ces deux grandeurs pour déterminer l'importance relative de l'affaiblissement et de la dépolarisation pour un système de télécommunication avec réutilisation des fréquences.

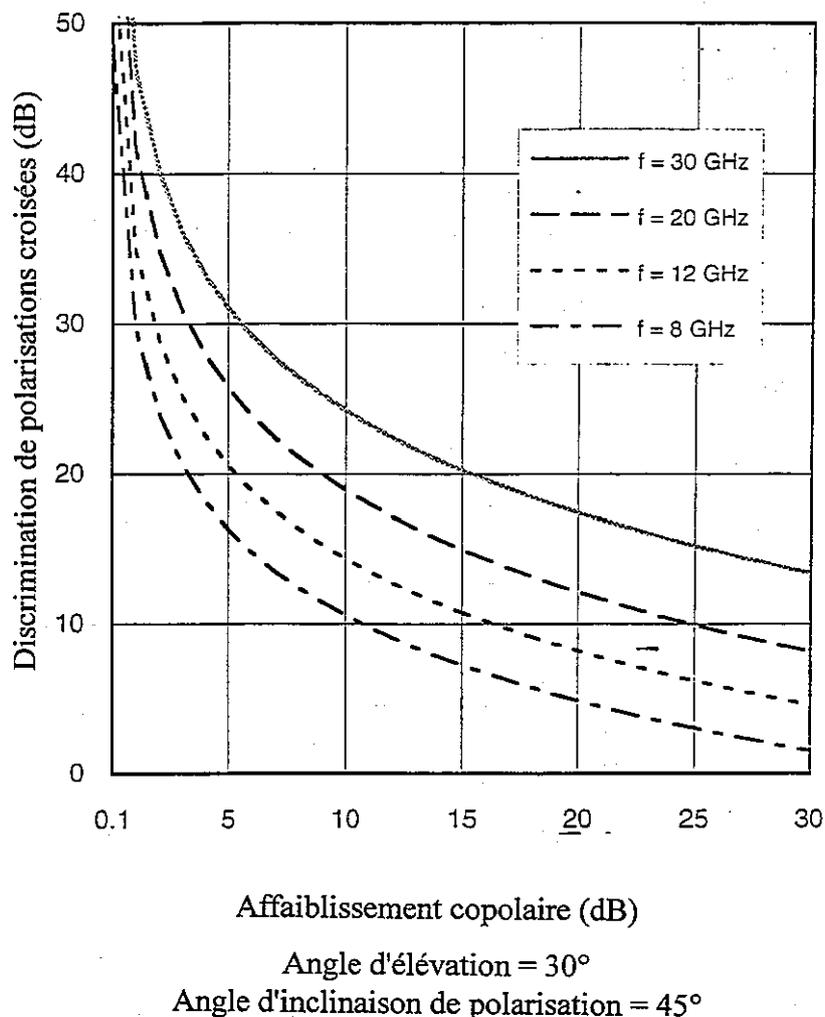


FIGURE 5.3

**Courbe du XPD par la pluie en fonction de l'affaiblissement copolaire par la pluie, illustrant l'influence de la fréquence**

Dans les bandes de fréquences des 6/4 GHz, toutefois, l'affaiblissement sur le trajet est petit et les estimations de l'affaiblissement par la pluie ne sont pas d'une grande utilité pour prévoir les statistiques de XPD. Dans ces bandes, où la dépolarisation peut être très importante, on peut utiliser la méthode de similitude en fréquence décrite au § 4.3 de la Recommandation UIT-R P.618 avec des estimations de l'affaiblissement pour une fréquence plus élevée (par exemple 8 GHz) ou avec, si elles sont disponibles, des statistiques de l'affaiblissement mesuré pour évaluer la polarisation croisée.

Pour évaluer les statistiques de XPD à des fréquences inférieures à 8 GHz environ, on peut aussi utiliser les relations entre le XPD, l'intensité de précipitation ponctuelle et la longueur de trajet équivalente [Oguchi, 1977; Kobayashi, 1977]. Une méthode de prévision simple permettant d'obtenir une distribution cumulative globale du XPD a été proposée par Olsen et Nowland [1978].

Le XPD correspondant à une valeur fixe de l'affaiblissement augmente avec la fréquence; la valeur prévue du XPD pour une fréquence et une configuration de système données tend donc à donner une estimation prudente pour des fréquences plus élevées. Par exemple, la valeur estimée du XPD pour la limite de fréquence supérieure de 35 GHz dans le modèle de l'UIT-R est une estimation prudente pour des fréquences supérieures à 35 GHz.

### 5.2.1.3 Influence du pourcentage de temps

Trois termes dans la méthode de prévision du XPD dépendent du pourcentage de temps. Le premier est la relation entre le  $XPD_p$  et l'affaiblissement copolaire  $A_p$ . On obtient la/les valeur(s) requise(s) de  $A_p$  à partir de statistiques cumulatives mesurées ou prévues de l'affaiblissement par la pluie pour le trajet de propagation considéré. Comme indiqué au § 5.2.1.1, la correction empirique, appliquée à la valeur estimée de  $XPD_{pluie}$  pour tenir compte de la dépolarisation par la glace, dépend elle aussi du pourcentage de temps.

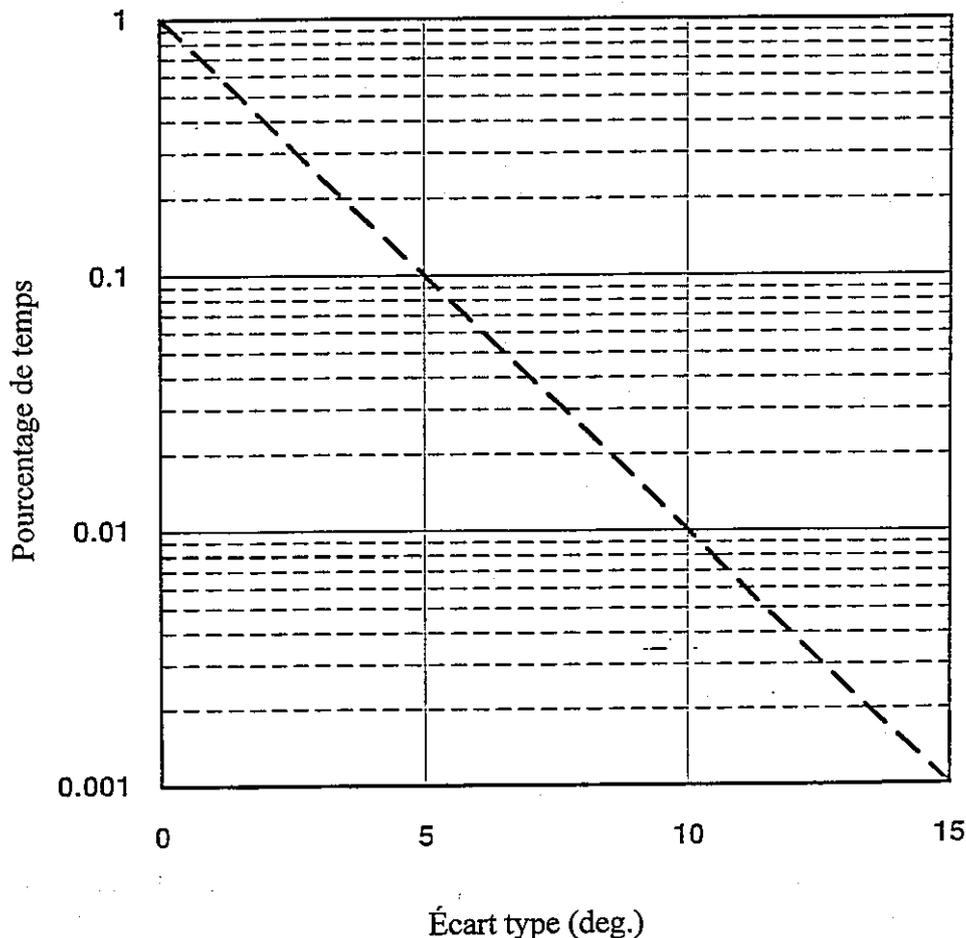


FIGURE 5.4

Relation entre l'écart type de la distribution de l'angle d'obliquité et le pourcentage de temps

L'autre terme qui dépend manifestement du pourcentage temps est l'angle d'obliquité  $C_\sigma$  donné par la formule:

$$C_\sigma = 0,0052 \sigma^2 \quad \text{dB} \quad (5.5)$$

où  $\sigma$  est l'écart type effectif (en degrés) de la distribution de l'angle d'obliquité pour des valeurs respectivement de  $0^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $10^\circ$  et  $15^\circ$  pour des pourcentages de temps de 1,0; 0,1; 0,01 et 0,001%. Il ressort à l'évidence de la Figure 5.4 qu'il existe une relation linéaire entre  $\sigma$  et le logarithme du pourcentage de temps sur la gamme d'applicabilité du modèle; cette relation peut être exprimée par l'équation simple suivante:

$$\sigma = -5 \log(p) \text{ deg.} \quad (5.6)$$

Pour que le calcul par machine soit plus commode, on peut combiner les équations (5.5) et (5.6), ce qui donne:

$$C_\sigma = 0,13 (\log p)^2 \quad \text{dB} \quad (5.7)$$

pour la gamme  $0,001 \leq p \leq 1,0$ . La correction résultante est faible allant de 0 pour  $p = 1\%$  à 1,17 dB pour  $p = 0,001\%$ .

### 5.2.2 Influence de la configuration du trajet

Les caractéristiques de dépolarisation d'une liaison de propagation dépendent non seulement de la géométrie de ce trajet mais aussi du type de polarisation et, pour une polarisation rectiligne et elliptique, de l'angle d'inclinaison de la polarisation par rapport à la verticale locale de l'emplacement de la station terrienne. L'angle d'élévation du trajet lui aussi influence l'asymétrie nette "perçue" par l'onde pendant la propagation par les précipitations (maximale pour un trajet horizontal mais quasi nulle au zénith, où les gouttes de pluie semblent pour l'onde incidente être pratiquement symétriques). Comme indiqué au § 5.2, on constate que le XPD dépend statistiquement de l'affaiblissement sur le trajet qui lui-même dépend beaucoup de l'angle d'élévation du trajet.

En tombant, les hydrométéores asymétriques ont tendance à avoir leur grand axe de symétrie aligné en moyenne sur la verticale locale [Cox, 1981]. L'angle d'inclinaison de la polarisation rectiligne ou elliptique est donc un paramètre très important.

Compte tenu de l'emplacement du satellite et de la station terrienne, on peut calculer les angles d'élévation et d'azimut du trajet et la distance par rapport au satellite à l'aide de méthodes standard (par exemple [Morgan et Gordon, 1989]). Dans le cas le plus général, le faisceau du satellite coupe la surface de la Terre en un point  $(a', b')$  où  $a'$  est la latitude et  $b'$  la différence entre la longitude du satellite et celle du point d'intersection. On peut calculer à partir de [Shkarofsky et Moody, 1976] l'angle d'inclinaison de polarisation,  $\tau$ , dans le cas d'une polarisation rectiligne ou elliptique, par rapport à la verticale de la station terrienne.

$$\tau = \arctg \frac{[\sin a' \cdot \cos a \cdot \sin b - \cos a' \cdot \sin b' \cdot \sin a]}{[\sin a' \cdot \sin a + \cos a' \cdot \sin b' \cdot \cos a \cdot \sin b]} \quad (5.8a)$$

où  $a$  est la latitude de la station terrienne (positive pour l'hémisphère Nord, négative pour l'hémisphère Sud), et  $b$  pour la longitude du satellite moins la longitude de la station terrienne (en degrés Est).

Toutefois, si le faisceau du satellite coupe la Terre à la même longitude que la longitude du satellite ( $b' = 0$ ) l'équation (5.8a) se ramène à:

$$\tau = \arctg(\sin b / \tg a) = 90^\circ - \arctg(\tg a / \sin b) \quad (5.8b)$$

toujours par rapport à la verticale de la station terrienne, ou

$$\tau = \arctg(\tg a / \sin b) \quad (5.8c)$$

par rapport à l'horizontale de la station terrienne [Barton, 1975], référence préférée étant donné que l'horizontale locale est toujours perpendiculaire au trajet de propagation. Dans le calcul ci-dessus, on suppose qu'un axe de polarisation du satellite est parallèle à l'équateur. Toutefois, si l'axe de polarisation subit une rotation  $\Delta\zeta$  par rapport à la direction de référence, la valeur de  $\tau$  donnée dans l'équation (5.8) est simplement incrémentée d'une valeur de  $\pm \Delta\zeta$  (le signe dépendant du sens de la rotation de polarisation au niveau du satellite).

Dans le cas d'une polarisation circulaire, l'angle d'inclinaison  $\tau$  est mis égal à  $45^\circ$ .

### 5.2.3 Évaluations de la qualité des modèles

Il ressort des évaluations des modèles de XPD avec des données de mesure [Yamada et Karasawa, 1990] que la méthode de la Recommandation UIT-R P.618 fonctionne bien. On a par ailleurs utilisé ces résultats d'essais pour améliorer le modèle, en exprimant en fonction du pourcentage de temps les termes correspondant à l'angle d'obliquité des gouttes de pluie et à la dépolarisation par les cristaux de glace.

### 5.2.4 Statistiques conjointes de XPD et de l'affaiblissement

Il est préférable d'utiliser, si elles existent, les distributions conjointes de probabilité cumulative de XPD et de l'affaiblissement  $A$  pour la conception des systèmes [Howell et autres, 1992], en particulier dans le cas des trajets Terre-espace où la variabilité de XPD du trajet pour une valeur donnée de  $A_p$  (essentiellement due à la dépolarisation par la glace) est importante avec des affaiblissements proches de la marge d'évanouissement du système. Toutefois, appliquée au calcul des marges d'évanouissement de systèmes à double polarisation, l'utilisation d'une relation d'équiprobabilité entre  $XPD_p$  et  $A_p$  pour le calcul des interruptions peut donner les mêmes résultats que l'utilisation de probabilités conjointes [van Cappellen et autres, 1980].

Il est possible de modéliser la distribution de probabilité conditionnelle de XPD pour une valeur donnée de l'affaiblissement, en supposant que le rapport des tensions du signal contrapolaire et du signal copolaire,  $r = 10^{-XPD/20}$ , suit une distribution normale. Les paramètres de la distribution sont les suivants: la valeur moyenne  $r_m$ , dont on constate qu'elle est très proche de  $10^{-XPD_{pluie}/20}$  avec  $XPD_{pluie}$  calculé selon la méthode de la Recommandation UIT-R P.618; et l'écart type  $s_r$ , qui reste quasiment constant et égal à 0,038 pour  $3 \text{ dB} \leq A_p \leq 8 \text{ dB}$ . Ces résultats pour la distribution de probabilité conditionnelle de XPD, obtenus pour une valeur donnée de l'affaiblissement, sont basés sur des études faites avec le satellite SIRIO [Mauri et autres, 1987].

### 5.2.5 Similitude en fréquence et en polarisation à long terme

On trouve au § 4.3 de la Recommandation UIT-R P.618 une méthode permettant de transposer les statistiques de XPD mesurées ou prévues pour une fréquence et un angle d'inclinaison de polarisation à une autre fréquence et un autre angle d'inclinaison. Cette méthode est très utile pour transposer les statistiques de XPD mesurées à une autre fréquence et pour extrapoler les statistiques prévues avec la méthode décrite au § 4.1 aux bandes des 6/4 GHz.

### 5.3 Influence des phénomènes physiques sur XPD et XPI

On a pu élaborer des formules qui décrivent la dépendance de la dépolarisation du trajet par rapport à des mécanismes physiques (rotation du plan de polarisation, affaiblissement différentiel et déphasage différentiel). Même si elles ne sont pas aussi utiles dans les applications des systèmes que les prévisions statistiques décrites ci-dessus, les résultats aident à comprendre les mécanismes physiques qui sont à l'origine du phénomène de dépolarisation sur le trajet.

#### 5.3.1 Rotation de Faraday dans l'ionosphère

Comme décrit au § 5.1.5, la dégradation du découplage de polarisation induite par la rotation du plan de la polarisation rectiligne est donnée par la formule:

$$\Delta XPI = -20 \log (\operatorname{tg} \Delta \phi) \quad \text{dB} \quad (5.9)$$

où  $\Delta \phi$  est la rotation nette. Pour une propagation dans l'ionosphère dans un seul sens et pour un angle d'élévation du trajet de  $30^\circ$ , la Recommandation UIT-R P.531 donne une valeur estimée de  $\Delta \phi$  correspondant au cas le plus défavorable de  $108^\circ$  à 1 GHz. On peut obtenir des estimations pour d'autres fréquences en appliquant une loi de similitude en  $1/f^2$  décrite au § 7.3.1.

Sur la base de ces données, la rotation de Faraday dépassera rarement  $1^\circ$  à 14/12 GHz (ce qui correspond à une XPI sur le trajet de 35 dB, dégradation modérée) et sera négligeable à 30/20 GHz. A 6/4 GHz toutefois, la rotation  $\Delta \phi$  peut être de plusieurs degrés dans des régions où les dégradations d'origine ionosphérique sont importantes (à proximité de l'équateur magnétique et dans les zones aurorales) et peut dépasser plusieurs rotations du plan de polarisation à des fréquences inférieures à 250 MHz environ.

Vus depuis la station terrienne, les plans de la polarisation rectiligne tournent dans des sens opposés sur les liaisons montante et descendante. Il n'est donc pas possible de remédier aux effets de la rotation de Faraday en imprimant une rotation au système d'alimentation de l'antenne si l'on utilise la même antenne à l'émission et à la réception. On peut utiliser des méthodes de compensation comportant une rotation du système d'alimentation [Wolff, 1985] dans différents cas. Comme on l'a dit précédemment, avec la polarisation circulaire on n'observe pas ce phénomène.

#### 5.3.2 Effets des précipitations

##### 5.3.2.1 Affaiblissement différentiel

La rotation  $\Delta \tau$  (degrés) du plan de polarisation sous l'effet de l'affaiblissement différentiel  $\Delta A$  (dB) entre les composantes orthogonales du vecteur de polarisation (par rapport aux axes d'une goutte de pluie oblique) est donnée par la formule [Lee, 1977]

$$\Delta \tau = |\phi - \tau| - \operatorname{tg}^{-1} [(10 - \Delta A / 20) \pm 1 \operatorname{tg} |\phi - \tau|] \quad \text{degrés} \quad (5.10)$$

où  $\phi$  est "l'angle d'obliquité moyen" du milieu dépolarisant ( $0^\circ$  environ en moyenne en cas de pluie ou de glace) [Cox, 1981];  $\tau$  est l'angle d'inclinaison du vecteur de polarisation de l'onde incidente, le signe  $\pm$  est positif pour une polarisation elliptique lévogyre de l'onde incidente et négatif pour une polarisation dextrogyre. L'équation (5.10) indique que les rotations ne sont pas les mêmes pour la polarisation dextrogyre et la polarisation lévogyre; c'est la raison pour laquelle l'affaiblissement différentiel modifie l'orthogonalité des polarisations incidentes.

Les données disponibles sur la propagation [Hendry et autres, 1980; Cox et Arnold, 1982; Jakoby et Rücker, 1993] indiquent que la valeur moyenne de  $\Delta A$  se situe aux environs de 0,25 dB pour un affaiblissement copolaire  $A_p$  de 5 dB, de 0,75 dB pour  $A_p = 10$  dB; et de 1,5 dB pour  $A_p = 15$  dB mais que cette valeur peut approcher 2 dB dans le dernier cas. On peut donc observer des rotations de polarisation importantes pour des systèmes caractérisés par des marges d'affaiblissement importantes. Toutefois, la dégradation correspondante de XPD est dépassée par la XPD due à la dégradation du rapport axial de l'onde (voir le paragraphe suivant).

### 5.3.2.2 Phase différentielle

Tout déphasage différentiel,  $\Delta\beta$ , subi par une onde incidente est à l'origine d'une rotation du vecteur de polarisation donnée par la formule [Lee, 1977]:

$$\Delta\tau' = |\phi - \tau| + 0,5 \operatorname{tg}^{-1} \left[ (2 \operatorname{cotg} |\phi - \tau| \cos \Delta\beta) / (1 - \operatorname{cotg}^2 |\phi - \tau|) \right] \quad (5.11)$$

et cause par ailleurs une dégradation de la valeur du rapport axial des tensions  $AR$  de l'onde, donnée par l'équation:

$$AR = 20 \log \{ \operatorname{tg} [ 0,5 (\pi - \sin^{-1} (\pm \sin \Delta\beta \sin 2 |\phi - \tau|)) ] \} \quad \text{dB} \quad (5.12)$$

où là aussi le signe  $\pm$  est positif pour une polarisation elliptique lévogyre de l'onde incidente et négatif pour une polarisation dextrogyre.

Des mesures du déphasage différentiel montrent qu'à 12 GHz la phase différentielle  $\Delta\beta$  peut être voisine de  $6^\circ$  (chutes de neiges abondantes), de  $15^\circ$  (pluie) et atteindre éventuellement  $30^\circ$  (précipitations importantes) (l'affaiblissement lui aussi sera très élevé) et  $20^\circ$  (cristaux de glace au-dessus de la pluie et dans un mélange de pluie et de glace). La rotation du plan de polarisation  $\Delta\tau'$  induite par la phase différentielle dépassera donc rarement quelques degrés.

Ainsi, la dégradation du rapport axial est la principale cause du XPD sur la plupart des trajets de propagation. Les statistiques de XPD sur les trajets découlant de la somme des différents facteurs sont estimées en utilisant une relation fonctionnelle entre XPD et l'affaiblissement sur le trajet (voir la Recommandation UIT-R P.618).

## 5.4 Données relatives à la compensation des polarisations croisées

Des expériences ont montré entre 6 et 4 GHz il existe une forte corrélation entre la dépolarisation due à la pluie sur les trajets Terre-espace, aussi bien à long terme que ponctuellement, [Ogawa et Allnutt, 1982; Matsunaka et autres, 1983] ce qui prouve qu'il est possible de compenser la dépolarisation sur la liaison montante en utilisant les données correspondantes de dépolarisation sur la liaison descendante. Ces expériences ont été faites pour des angles d'élévation du trajet respectivement de  $38^\circ$  et de  $9^\circ$  et sous différents climats. Seuls les effets de la phase différentielle étaient tangibles même en cas de précipitations intenses et à 6/4 GHz il suffit d'appliquer une compensation de la phase différentielle à un seul paramètre. Des analyses [Overstreet et Bostian,

1979; McEwan et autres, 1981] font apparaître que les systèmes de compensation de la dépolarisation à un seul paramètre peuvent eux aussi être utiles pour certaines applications à des fréquences plus élevées.

Des mesures à 6/4 GHz indiquent que 99% des variations de XPD sont plus lentes que  $\pm 4$  dB/s ou, ce qui est équivalent, inférieures à  $\pm 1,5^\circ/s$  pour le déphasage différentiel moyen sur le trajet. Par conséquent, la constante de temps d'un système de compensation de la dépolarisation à ces fréquences ne doit être que d'une seconde environ [Matsunaka et autres, 1983; Allnutt, 1984].

Des mesures des polarisations croisées [Howell, 1977; Fimbel et Ramat, 1977] ont par ailleurs montré que la phase relative entre les signaux copolaire et contrapolaire est en principe relativement constante (de l'ordre de  $\pm 20^\circ$ ) mais que, dans certaines circonstances, il peut se produire de brusques variations de l'ordre de  $180^\circ$ . On a constaté que des variations brusques de XPD, de l'ordre de plusieurs décibels, se produisaient dans une fourchette de 0,1 à 0,3 s qui coïncide avec la survenue d'éclairs, suggérant des modifications dans l'alignement des cristaux de glace [Howell, 1977; Watson et autres, 1979].

Avec certains systèmes fonctionnant en double polarisation, pour des fréquences supérieures à 10 GHz, il faudra peut-être utiliser la diversité d'emplacement ou la régulation de puissance sur la liaison montante pour réduire les dégradations dues à la pluie, en particulier pour des angles d'élévation faibles. Pour évaluer l'amplitude de la composante contrapolaire qui demeure après application de la diversité d'emplacement ou de la régulation de puissance, on a besoin de données sous forme de statistiques conjointes de dépolarisation et d'affaiblissement (voir le § 5.2.4). Des mesures effectuées pour un angle d'élévation de  $6,6^\circ$  [Yamada et autres, 1985] ont montré que la scintillation troposphérique est à l'origine d'affaiblissements de faible niveau et de durée plus longue sans qu'il y ait pour autant dépolarisation; ce phénomène influe profondément sur ces statistiques conjointes.

## 5.5 Inclusion de XPD trajet dans XPI système

Les parts respectives de la composante contrapolaire dues à l'antenne de satellite ( $XPI_{sat}$ ), au XPD sur le trajet et à l'antenne de la station terrienne ( $XPI_{es}$ ) sont des grandeurs complexes avec des composantes d'amplitude et de phase qui s'ajoutent vectoriellement dans le plan complexe. Le XPD net perçu par le récepteur est la somme de ces parts et éventuellement des parts d'autres systèmes qui peuvent avoir des amplitudes et des phases tout à fait différentes.

La Figure 5.5 donne un exemple dans lequel les vecteurs arbitraires  $V_1$ ,  $V_2$  et  $V_3$  sont additionnés dans le plan complexe (rapporté à la phase de  $V_1$ ) pour obtenir une résultante  $\mathcal{R}$ . Si  $V_1$  et  $V_2$  correspondent aux isolements résiduels respectifs  $XPI_{sat}$  et  $XPI_{es}$  et si  $V_3$  correspond à XPD sur le trajet, la résultante  $\mathcal{R}$  ne dépend que faiblement de la dépolarisation sur le trajet et l'isolement net dépend essentiellement des équipements eux-mêmes lorsque l'antenne est mal isolée. Pour que la dépolarisation sur le trajet exerce une influence régulière et prévisible sur l'isolement du système, le XPD sur le trajet doit l'emporter sur les effets résiduels pendant les dégradations.

Dans l'hypothèse simplificatrice d'une addition correspondant au cas le plus défavorable (colinéaire), elles se combinent par simple sommation des tensions:

$$XPD_{net} = -20 \log [10^{-XPI_{sat}/20} + 10^{-XPD_{path}/20} + 10^{-XPI_{es}/20}] \quad (5.13)$$

Dans ce cas, le XPD net est donné par et toujours inférieur à (pire que) la plus faible (la plus mauvaise) valeur de XPI ou XPD dans la sommation.

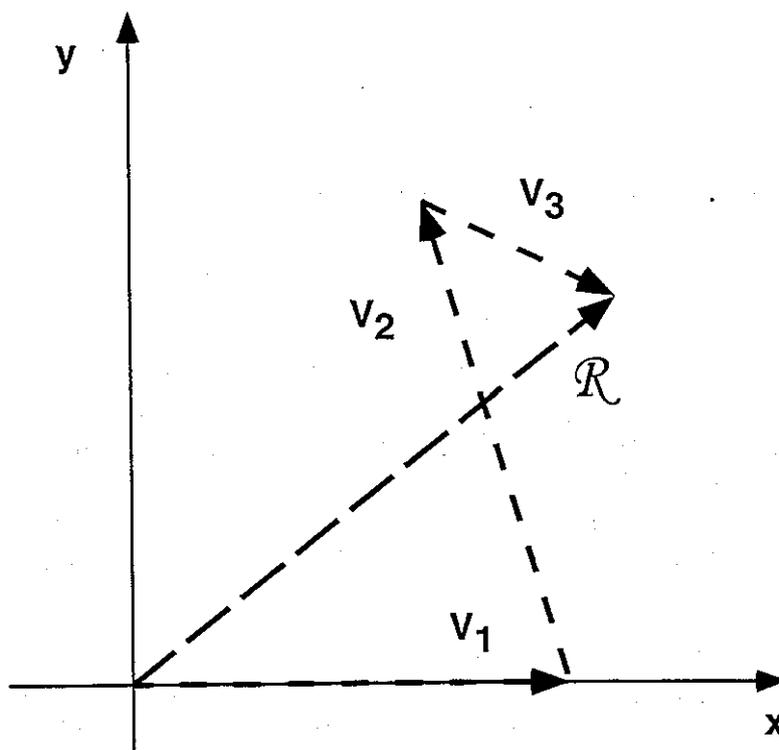


FIGURE 5.5

**Addition des trois vecteurs arbitraires dans le plan complexe pour obtenir la résultante  $\mathcal{R}$**

Plusieurs facteurs influent sur le découplage de polarisation d'un système en atmosphère claire: les manoeuvres de maintien en position du satellite, l'erreur de pointage de l'antenne et la courbure des rayons par réfraction, qui peuvent provoquer une réception des signaux hors axe (à moins que le phénomène ne soit compensé par un système de poursuite d'antenne). Dans les systèmes opérationnels avec réutilisation des fréquences, le découplage résiduel contrapolaire de l'antenne du satellite et de l'antenne de la station terrienne est maintenu bas; pour maintenir un découplage suffisant, on peut utiliser une technique de codage ou annuler d'une façon ou d'une autre la composante contrapolaire. Si le satellite ou la station terrienne interviennent peu dans le découplage total du système, la performance en double polarisation dépend essentiellement des équipements eux-mêmes, indépendamment des dégradations sur le trajet.

**5.6 Exemple de calcul de XPD trajet**

Pour illustrer son utilisation, on applique la méthode décrite dans la Recommandation UIT-R P.618 pour évaluer la dépolarisation sur le trajet dans le cas d'un trajet Terre-espace type. Étant donné que cette méthode établit une relation entre les statistiques de  $XPD_p$  et l'affaiblissement par la pluie du signal copolaire, il faut disposer dès le début du calcul des valeurs de  $A_p$  pour tous les pourcentages de temps considérés. Dans l'exemple qui nous intéresse, on calcule une distribution cumulative de l'affaiblissement par la pluie pour un trajet de propagation fictif en utilisant la méthode de prévision de la Recommandation UIT-R P.618. Si elles sont disponibles, on peut également utiliser des statistiques mesurées des valeurs de l'affaiblissement pour la fréquence souhaitée ou des statistiques extrapolées à partir de données sur l'affaiblissement à une autre fréquence comme source pour les statistiques de  $A_p$ .

### 5.6.1 Application étape par étape de la méthode

On suppose que l'on a besoin de statistiques sur les dégradations pour planifier le trajet d'une liaison montante à polarisation rectiligne à 12 GHz entre une station terrienne et un satellite géostationnaire. La station terrienne est située à une latitude de  $45^\circ$  et la différence entre la longitude du satellite et celle de la station est de  $55^\circ$ . Le point de visée du faisceau du satellite coupe la Terre à la même longitude que la longitude du satellite. La station est située dans la zone hydroclimatique H définie par l'UIT-R, zone dans laquelle l'intensité de précipitation dépassée pendant 0,01% du temps devrait être de 32 mm/h (voir la Recommandation UIT-R P.837). La hauteur de la station au-dessus du niveau moyen de la mer est de 100 m (c'est-à-dire  $h_s = 0,1$  km).

Pour la configuration donnée, on calcule que l'angle d'élévation du trajet est de  $15,6^\circ$  et que l'angle d'inclinaison de polarisation, obtenu à partir de l'équation 5.8c, est de  $50,7^\circ$  par rapport à l'horizontale au niveau du sol. A partir de la Recommandation UIT-R P.838, on calcule que les coefficients d'affaiblissement linéique à 12 GHz correspondant aux angles d'élévation et d'inclinaison sont respectivement de  $k = 0,0176$  et  $\alpha = 1,207$ . On obtient la distribution cumulative de l'affaiblissement par la pluie (Figure 5.6) en appliquant la méthode de prévision de l'affaiblissement par la pluie de la Recommandation UIT-R P.618 (voir le § 3.2.5 du présent manuel pour un exemple de calcul détaillé).

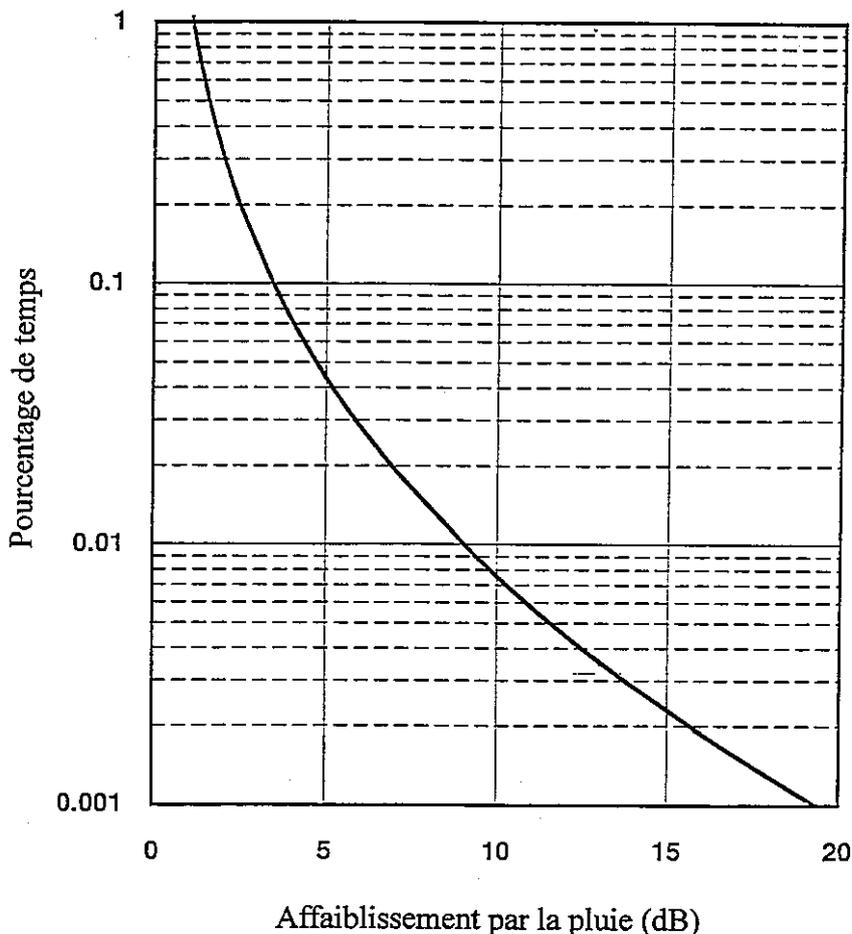


FIGURE 5.6

**Statistiques d'affaiblissement par la pluie pour un trajet de propagation à 12 GHz (exemple de calcul)**

Une fois que l'on dispose des statistiques d'affaiblissement par la pluie requises, il est assez simple d'appliquer étape par étape la méthode de prévision du XPD décrite au § 4.1 de la Recommandation UIT-R P.618:

Étape 1: calcul du terme dépendant de la fréquence pour  $f = 12$  GHz:

$$C_f = 30 \log f = 32,4 \quad \text{dB} \quad (5.14)$$

Étape 2: Étant donné que  $8 \leq f \leq 20$  GHz, le coefficient  $V(f)$  requis dans le terme dépendant de l'affaiblissement est:

$$V(f) = 12,8f^{0,19} = 20,5 \quad (5.15)$$

On utilise ce coefficient et les valeurs de  $A_p$  (voir la Figure 5.6) pour établir, à partir de l'expression suivante, un tableau des termes dépendant de l'affaiblissement par la pluie pour les pourcentages de temps requis:

$$C_A = V(f) \log A_p = 20,5 \log A_p \quad \text{dB} \quad (5.16)$$

Le tableau n'est pas reproduit ici mais la méthode est relativement simple en particulier si on procède sur ordinateur ou avec un tableur.

Étape 3: Calcul du facteur d'amélioration de polarisation pour  $\tau = 50,7^\circ$ :

$$C_\tau = -10 \log [1 - 0,484 (1 + \cos 4\tau)] = 0,17 \quad \text{dB} \quad (5.17)$$

Étape 4: Calcul du terme dépendant de l'angle d'élévation pour  $\theta = 15,6^\circ$ :

$$C_\theta = -40 \log (\cos \theta) = 0,65 \quad \text{dB} \quad (5.18)$$

Étape 5: En utilisant la courbe du § 5.2.1.3, on calcule à partir de l'équation 5.7 le facteur de correction de l'angle d'obliquité pour les pourcentages de temps requis:

$$C_\sigma = 0,13 (\log p)^2 \quad \text{dB} \quad (5.19)$$

Les corrections sont portées dans un tableau en fonction du pourcentage de temps  $p$  tout comme les coefficients  $C_A$  dans l'étape 2.

Étape 6: Avec les coefficients calculés dans les étapes 1 à 5, on calcule, à partir de l'expression, la composante dépolariation par la pluie qui est ensuite portée dans un tableau pour les pourcentages de temps désirés:

$$XPD_{pluie} = 32,4 - 20,5 \log A_p + 0,17 + 0,65 + 0,13 (\log p)^2 \quad \text{dB} \quad (5.20)$$

Étape 7: Pour les pourcentages de temps désirés  $p$ , la correction pour la dépolarisation par la glace est calculée à partir de la formule:

$$C_{glace} = XPD_{pluie} (0,3 + 0,1 \log p) / 2 \quad \text{dB} \quad (5.21)$$

et les calculs sont également portés dans un tableau.

Étape 8: On calcule enfin le XPD net pour les pourcentages de temps requis  $p$  à l'aide de la formule:

$$XPD_p = XPD_{pluie} - C_{glace} \quad \text{dB} \quad (5.22)$$

Les statistiques cumulatives résultantes de  $XPD_p$  correspondant à des pourcentages de temps compris entre 0,001% et 1% (Figure 5.7) sont présentées pour une évaluation des caractéristiques de propagation de la liaison Terre-espace prévue. On utilise les Figures 5.6 et 5.7 pour évaluer respectivement les marges d'affaiblissement et de XPD qui sont nécessaires pour atteindre un certain niveau de disponibilité du trajet ou de qualité de fonctionnement des systèmes.

### 5.6.2 Exemple d'application de système

On peut utiliser les estimations de l'affaiblissement et du XPD des Figures 5.6 et 5.7 pour voir qui de la dépolarisation ou de l'affaiblissement sera la principale cause de la dégradation de la qualité de fonctionnement de la liaison planifiée. Comme cela a été dit au § 5.2.4, il est préférable d'utiliser à cette fin les statistiques conjointes de XPD et d'affaiblissement, si elles sont disponibles, ce qui est rare. Sinon, les statistiques équiprobables de dépolarisation et d'affaiblissement sont en général des indicateurs fiables des niveaux relatifs de la dégradation.

La courbe équiprobable souhaitée de  $XPD_p$  en fonction de  $A_p$ , que l'on obtient à partir des Figures 5.6 et 5.7 en utilisant comme paramètre le pourcentage de temps équiprobable, est illustrée à la Figure 5.8. Les niveaux prévus de XPD sont plutôt élevés par rapport à l'affaiblissement, ce qui n'est pas surprenant compte tenu de la géométrie du trajet (angle d'élévation relativement faible et angle d'inclinaison de polarisation proche de  $45^\circ$ , valeur correspondant au cas le plus défavorable).

On suppose pour l'illustration que la disponibilité spécifiée du trajet de la liaison montante est de 99,99% (c'est-à-dire une indisponibilité de 0,01%). Il ressort de la Figure 5.6 que l'affaiblissement sur le trajet dépassé pendant 0,01% du temps est de 9,0 dB. Si cette marge de protection contre les évanouissements peut être assurée pour la liaison, la Figure 5.8 montre que le niveau équiprobable de XPD correspondant est de 13,4 dB, ce qui représente pour de nombreux systèmes un niveau important de brouillage par polarisations croisées. Si ce niveau de XPD n'est pas tolérable compte tenu des objectifs de qualité de fonctionnement, il faudra peut-être dans la conception des systèmes intégrer des techniques de réduction ou de compensation [Allnutt, 1989] pour atténuer les effets des dégradations dues aux polarisations croisées.

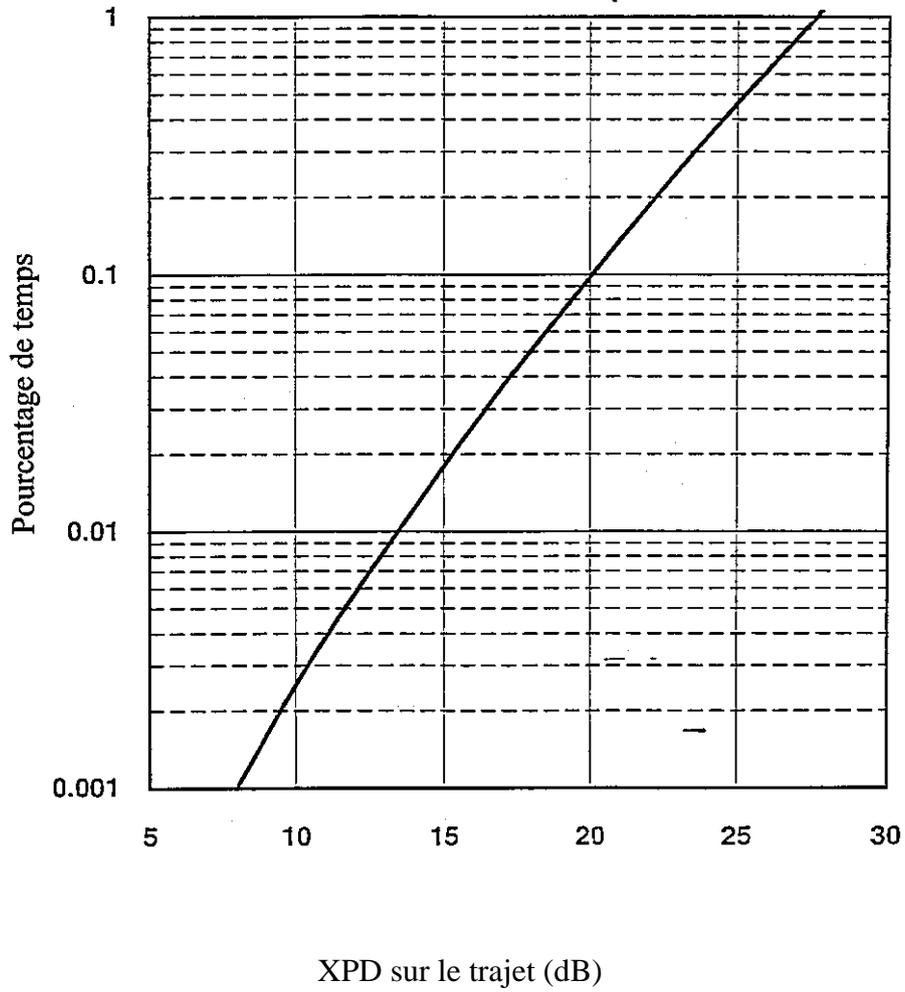


FIGURE 5.7  
Statistiques cumulatives de XPD pour un trajet de propagation à 12 GHz (exemple de calcul)

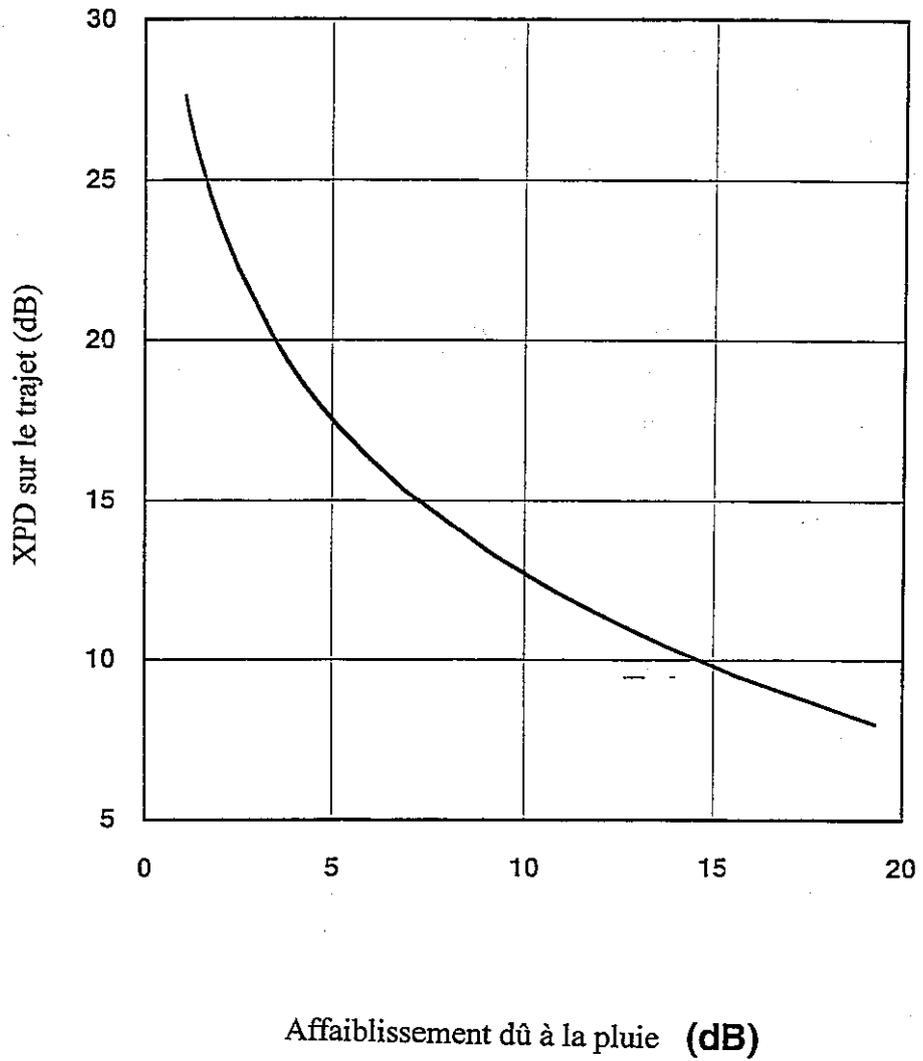


FIGURE 5.8

**Courbe équiprobable de XPD sur le trajet en fonction de l'affaiblissement du signal copolaire dû à la pluie (exemple de calcul)**

RÉFÉRENCES POUR LE CHAPITRE 5

- ALLNUTT, J.E. [1984] The system implications of 6/4 GHz satellite-to-ground signal depolarisation results from the INTELSAT propagation measurement programme," *Intl. J. Satell. Commun.*, Vol. 2, 73-80.
- ALLNUTT, J.E. [1989] *Satellite-to-Ground Radiowave Propagation*, Chap. 5, Depolarisation effects, 249-318. Peter Peregrinus Ltd., Londres.
- BARTON, S.K. [1975] Polarisation distortion in systems employing orthogonal polarisation frequency reuse. *Marconi Rev.*, Vol. XXXVIII, 153-168.
- BECKMANN, P. [1968] *The depolarization of electromagnetic waves*, § 1.5, mathematical representation of polarization, 24-38. Golem Press, Boulder, Etats-Unis d'Amérique.
- CHU, T.S. [1971] Restoring the orthogonality of two polarizations in radio communication systems, I. *BSTJ*, Vol. 50, 9, 3063-3069.
- CHU, T.S. [1982] A semi-empirical formula for microwave depolarization versus rain attenuation on earth-space paths. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. COM-30, 12, 2550-2554.
- COX, D.C. [1981] Depolarization of radio waves by atmospheric hydrometeors in earth-space paths: A review. *Radio Sci.*, Vol. 16, 5, 781-812.
- COX, D.C. et ARNOLD, H. W. [1982] Results from the 19- et 28-GHz COMSTAR satellite propagation measurements at Crawford Hill. *Proc. IEEE*, Vol. 70, 5, 458-488.
- COX, D.C. et ARNOLD, H. W. [1984] Comparison of measured cross-polarization isolation and discrimination for rain and ice on a 19-GHz space-earth path. *Radio Sci.*, Vol. 19, 2, 617-628.
- DiFONZO, D.F., TRACHTMAN, W. S. et WILLIAMS, A.W. [1976] Adaptive polarization control for satellite frequency reuse systems. *COMSAT Tech. Rev.*, Vol. 6, 2, 253-283.
- DISSANAYAKE, A.W., HAWORTH, D.P. et WATSON, P.A. [1980] Analytical models for cross-polarization on earth-space radio paths for frequency range 9-30 GHz. *Ann. Télécommunic.*, Vol 35, 11-12, 398-404.
- FIMBEL, J. et RAMAT, P. [1977] Mesures de l'affaiblissement et de la dépolarisation à 20 GHz à partir du satellite ATS-6 *Proc. ATS-6 Meeting*, ESA Publ. SP-31, 79-84, octobre.
- FUKUCHI, H. AWAKA, J. et OGUCHI, T. [1984] Improved theoretical formula for the relationship between rain attenuation and depolarisation," *Electron. Lett.*, Vol. 20, 21 859-860.
- HENDRY, A., McCORMICK, G.C. et ANTAR, Y.M.M. [1980] Differential propagation constants on slant paths through snow as measured by 16.5 GHz polarization diversity radar. *Preprints URSI Comm. F Open Symp.*, Lennoxville, Canada, 6.7.1-6.7.6, 26-30 mai.
- HOWELL, R.G. [1977] Crosspolar phase variations at 20 and 30 GHz on a satellite-Earth path. *Electron. Lett.*, Vol. 13, 405.
- HOWELL, R.G., HARRIS, J.W. et MEHLER, M. [1992] Satellite crosspolar measurements at BT Laboratories. *BT Tech. J.*, Vol. 10, 4, 52-67.

- IPPOLITO, L.J. [1981] Radio propagation for space communications systems. *Proc. IEEE*, Vol. 69, 6, 697-727.
- JAKOBY, R. et RÜCKER, F. [1993] Three years of crosspolar measurements at 12.5, 20 and 30 GHz with the Olympus satellite. *Proc. Olympus Utilisation Conf.*, Séville, Espagne, 567-572, 20-22 avril.
- KOBAYASHI, T. [1977] Degradation of cross-polarization isolation due to rain. *J. Radio Res. Labs. (Japan)*, Vol. 24, 114, 101-107.
- LEE, M.K. [1977] Cross-polarization performance of the RCA Satcom system. *RCA Rev.*, Vol. 38, 171-210, juin.
- MATSUNAKA, N., MATSUZAWA, K., YUKI, H. et FURUTA, O. [1983] Correlation of 6 and 4 GHz rain-induced depolarization at low elevation angles. *Proc. URSI Comm. F Symp.*, Louvain, Belgique.
- MAURI, M., PARABONI, A. et TARDUCCI, D. [1987] Depolarisation measurements and their use in the determination of dual polarization links performance. *Alta. Freq.*, Vol. LVI, 1-2, 47-55.
- McEWAN, N.J., GUNES, M. et MAHMOUD, M.S. [1981] RF methods for adaptive cancellation of cross-polarisation in microwave satellite systems. *IEE Conf. Publ. No. 195*, Pt. 2, 188-192.
- McEWAN, N.J., et LEITAO, M.J. [1982] Propagation studies for feeder link design. Bradford University Research Ltd., Report 329, prepared for ESA under ESTEC Contract No. 4471/80/NL/DG, août.
- MORGAN, W.L. et GORDON, G.D. [1989] *Communications Satellite Handbook*, Chap. 6, Satellite Orbits, 774-870. Wiley-Interscience, New York.
- NOWLAND, W.L., OLSEN, R.L. et SHKAROFSKY, I.P. [1977] Theoretical relationship between rain depolarisation and attenuation. *Electron. Lett.*, Vol. 13, 22, 676-678.
- OGAWA, A. et ALLNUTT, J.E. [1982] Correlation of 6 and 4 GHz depolarization on slant paths. *Electron. Lett.*, Vol. 18, 5, 230-232.
- OGUCHI, T. [1977] Scattering properties of Pruppacher-and-Pitter from raindrops and cross-polarization due to rain: Calculations at 11, 19.3 and 34.8 GHz. *Radio Sci.*, Vol. 12, 1, 41-51.
- OGUCHI, T. [1983] Electromagnetic wave propagation and scattering in rain and other hydrometeors. *Proc. IEEE*, Vol. 71, 9, 1029-1078.
- OLSEN, R.L. et NOWLAND, W.L. [1978] Semi-empirical relations for the prediction of rain depolarization statistics: Their theoretical and experimental basis. *Proc. Int. Symp. on Antennas and Propagation*, 477-480, Sendai, Japon, août.
- OVERSTREET, W.P. and BOSTIAN, C.W. [1979] Crosstalk cancellation on linearly and circularly polarized communications satellite links. *Radio Sci.*, Vol 14, 6, 1041-1047.
- ROGERS, D.V. [1985] Propagation considerations for satellite broadcasting at frequencies above 10 GHz. *IEEE J. Select. Areas Commun.*, Vol. SAC-3, 1, 100-110.

- ROGERS, D.V. et ALLNUTT, J.E. [1986] System implications of 14/11 GHz path depolarization. Part I: Predicting the impairments. *Intl. J. Satell. Commun.*, Vol. 4, 1-11.
- SHKAROFSKY, I.P. et MOODY, H.J. [1976] Performance characteristics of antennas for direct broadcasting satellite systems including effects of rain depolarization. *RCA Review*, Vol. 37, 279-319. (Sign error in equation 38 corrected in Shkarofsky, I.P. [1977] Depolarisation due to precipitation in satellite communications, *RCA Review*, Vol. 38, 257-309.)
- STUTZMAN, W.L. et RUNYON, D.L. [1984] The relationship of rain-induced cross-polarization discrimination to attenuation for 10 to 30 GHz earth-space radio links. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-32, 7, 705-710.
- VAN CAPELLEN, J., MAWIRA, A., NEESSEN, J. et ZELDERS, F. [1980] Joint statistics of attenuation and cross-polarization measured with the OTS satellite. *Proc. NATO/AGARD Conf.*, No. 284, Paris.
- WATSON, P.A., McEWAN, N.J., DISSANAYAKE, A.W. et HAWORTH, D.P. [1979] Attenuation and cross-polarisation measurements at 20 GHz using the ATS-6 satellite with simultaneous radar observations. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-27, 11-17.
- WOLFF, R.S. [1985] Minimization of Paraday depolarization effects on satellite communication systems at 6/4 GHz. *Intl. J. Satell. Commun.*, Vol. 3, 275-286.
- YAMADA, M., YASUKAWA, K., FURUTA, O., KARASAWA, Y. et BABA, N. [1985] A propagation experiment on Earth-space paths of low elevation angles in the 14 and 11 GHz band using the INTELSAT-V satellite. *Proc. Intl. Symp. Ant. Prop.*, Kyoto.
- YAMADA, M., KARASAWA, Y. [1990] Model testing for XPD on earth-space paths. Presented at URSI XXIII General Assembly, Prague, Rép. tch., 28 août - 5 septembre.

## CHAPITRE 6

### EFFETS PRODUITS DANS L'ATMOSPHERE CLAIRE

#### 6.1 Affaiblissement dû à la défocalisation et au défaut de cohérence du front de l'onde

La diminution régulière de l'indice de réfraction avec l'altitude a pour effet de courber le rayon et, par conséquent, de causer une défocalisation aux petits angles d'élévation [Manuel de l'UIT-R sur la radiométéorologie]. Yokoi et autres [1970] et Crane [1971] ont évalué cette défocalisation du faisceau d'antenne. L'affaiblissement est indépendant de la fréquence; il est inférieur à 0,4 dB à l'élévation  $3^\circ$ , même pour les très grandes valeurs du coïndice de réfraction au niveau du sol. On trouve au § 2.3.2 de la Recommandation UIT-R P.618 des expressions permettant d'évaluer l'affaiblissement dû à la défocalisation (étalement des faisceaux) sur des trajets caractérisés par de très petits angles d'élévation. Il est tenu implicitement compte de l'affaiblissement dans les méthodes de prévision dans le cas d'évanouissements à faible angle (§ 2.4.2 et 2.4.3 de la même Recommandation).

La structure de l'indice de réfraction de l'atmosphère est sujette à des irrégularités à petite échelle, qui produisent un défaut de cohérence du front de l'onde sur l'antenne de réception. Ce phénomène a deux conséquences: des fluctuations rapides du signal (voir le paragraphe suivant) et une perte par couplage antenne-milieu qui équivaut à une diminution du gain de l'antenne. Dans la pratique, la diminution du signal du fait du manque de cohérence du front de l'onde est notable seulement pour les antennes à grande ouverture, les fréquences élevées et les angles d'élévation inférieurs à  $5^\circ$ . Des mesures effectuées au Japon avec une antenne de 22 mètres [Yokoi et autres, 1970] indiquent que pour un angle d'élévation de  $5^\circ$  l'affaiblissement du signal est de l'ordre de 0,2 à 0,4 dB aux fréquences 6/4 GHz. Des mesures avec une antenne de 7 mètres, à 15,5 et 31,6 GHz, ont donné des valeurs d'affaiblissement de 0,3 et 0,6 dB, respectivement, pour un angle d'élévation de  $5^\circ$  [Yamada et Yokoi, 1974].

#### 6.2 Effets de la scintillation et de la propagation par trajets multiples

##### 6.2.1 Généralités

Les irrégularités à petite échelle de l'indice de réfraction de l'atmosphère causent des variations rapides de l'amplitude. Il est peu probable que la diffusion troposphérique, en l'absence de précipitation, cause des évanouissements profonds dans les systèmes de télécommunication spatiale fonctionnant à des fréquences inférieures à 10 GHz et des angles d'élévation de plus de  $10^\circ$ . Par ailleurs, à de faibles angles d'élévation et à des fréquences au-dessus de 10 GHz environ, les scintillations troposphériques risquent occasionnellement de dégrader sévèrement la qualité.

La scintillation peut être causée également par des irrégularités de l'ionosphère; voir à ce sujet le § 7.4.

Tatarskii a établi une formule théorique qui donne une estimation des fluctuations de l'amplitude logarithmique, sur la base de l'hypothèse suivante: la structure de l'indice de réfraction de l'ionosphère dans le domaine spatial est conforme à un spectre du type Kolmogorov [Tatarskii, 1961]. Lorsque la turbulence atmosphérique est contenue dans la sous-gamme inertielle des irrégularités de l'indice de réfraction, la variance de l'amplitude logarithmique, en dB, est donnée par:

$$\sigma_x^2 = 42,9 \left( \frac{2\pi}{\lambda} \right)^{\frac{7}{6}} \int_0^L C_n^2(r) r^{\frac{5}{6}} dr \quad \text{dB}^2 \quad (6.1)$$

où  $L$  désigne la longueur équivalente du trajet entre la limite de la turbulence et le point de réception;  $\lambda$ , la longueur d'onde radioélectrique; et  $C_n$ , le paramètre de structure de l'indice de réfraction, variable le long du trajet Terre-espace. On sait que le paramètre de structure dépend non seulement de la variance de l'indice de réfraction de l'atmosphère, mais aussi de l'échelle externe des irrégularités [Ishimaru, 1978]. Il n'est donc pas possible de déterminer directement, à partir des grandeurs météorologiques généralement disponibles, les valeurs de ce paramètre le long d'un trajet oblique donné. D'où la difficulté de calculer  $C_n$ .

Pour cette raison, l'ex-CCIR utilisait un modèle empirique basé sur des données de mesure obtenues à la fréquence 7,3 GHz, à un angle d'élévation de 1° et avec une antenne de 36,6 m de diamètre [Crane, 1976], avec similitude appliquée à la fréquence, à l'angle d'élévation et au diamètre de l'antenne. Ce premier modèle se composait de facteurs simples et l'on savait qu'il donnait des valeurs d'estimation proches des valeurs mesurées à l'époque. Cependant, ce modèle ne contient pas de paramètres météorologiques, de telle sorte qu'il ne permettait pas de mettre en évidence les influences régionales et saisonnières. La méthode révisée, décrite dans la Recommandation UIT-R P.618, élaborée pour rendre compte de ces facteurs, se fonde sur les travaux de Karasawa et autres [1988a, b], Crane [1976], Lo et autres [1984], Rucker et Ortgies [1985] et Banjo et Vilar [1986].

## 6.2.2 Fondements du modèle de scintillation

### 6.2.2.1 Variations saisonnières et journalières

Compte tenu d'un certain nombre de résultats de mesure de la scintillation [Karasawa et autres, 1988a; Banjo et Vilar, 1986; Vander Vorst et autres, 1982; Rucker et Ortgies, 1985], on peut résumer comme suit les caractéristiques des variations saisonnières et journalières:

- 1) Dans les régions situées aux latitudes moyennes, où l'environnement météorologique subit des variations saisonnières relativement grandes, la scintillation varie fortement selon la saison, avec un maximum pendant les mois d'été. S'agissant des variations journalières, on a observé que les plus grandes scintillations se situent aux alentours de 12:00-15:00, mais la variation journalière est généralement plus faible que la variation saisonnière. La Figure 6.1 montre les variations journalières et saisonnières telles qu'elles ressortent des mesures de Yamaguchi ( $f = 11,45$  GHz; angle d'élévation 6,5°) [Karasawa et autres, 1988a].
- 2) On observe une corrélation étroite entre la valeur moyenne de l'intensité de scintillation pour chaque mois et le terme humide,  $N_{hum}$ , de l'indice de réfraction (unités N) dû à la vapeur d'eau atmosphérique (moyenne sur un mois). La Figure 6.2 montre la relation qui existe entre la moyenne mensuelle de la fluctuation quadratique moyenne et  $N_{hum}$  dans les mesures de Yamaguchi.

Dans le modèle de prévision de la scintillation de la Recommandation UIT-R P.618, on a adopté la relation illustrée par la Figure 6.2, avec une petite modification consistant à inclure des données de scintillation d'autres régions.

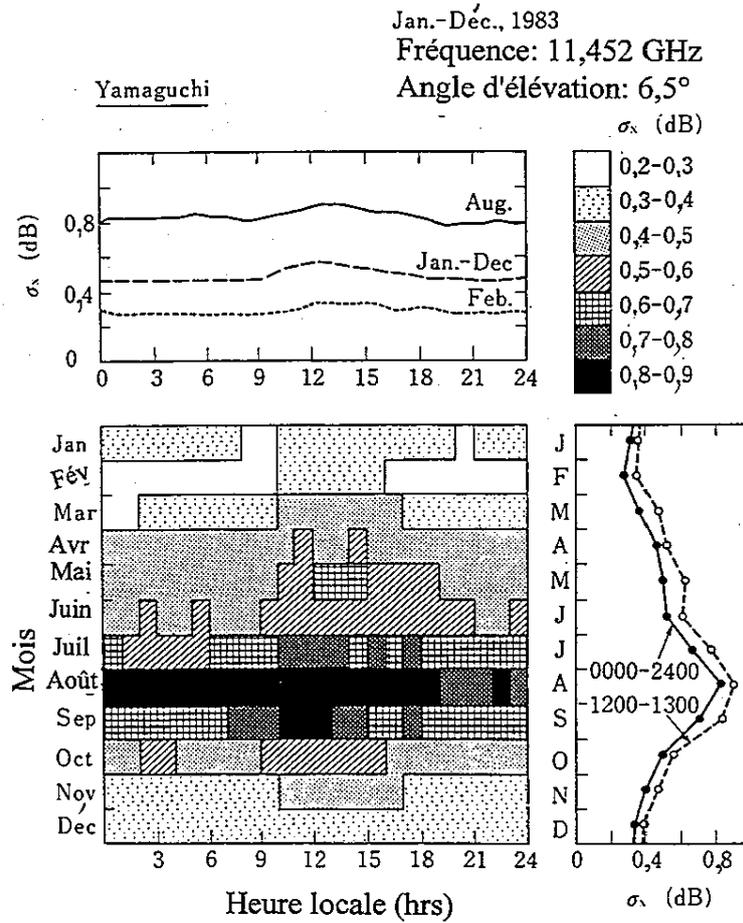


FIGURE 6.1

Variations journalières et saisonnières de la scintillation dans une région située aux latitudes moyennes. En haut et à gauche: variation journalière. En bas et à gauche: variations journalière et saisonnière. En bas et à droite: variation saisonnière

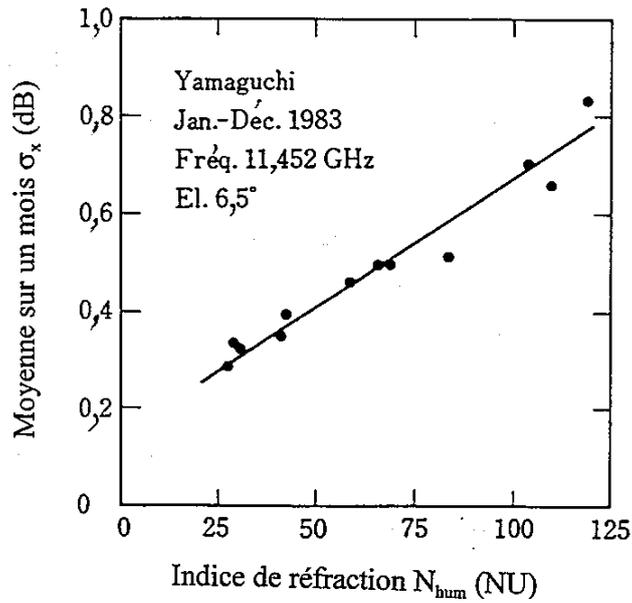


FIGURE 6.2

Relation entre la moyenne mensuelle de la fluctuation quadratique moyenne et  $N_{hum}$  dans les mesures de Yamaguchi

### 6.2.2.2 Influence de la fréquence

On a montré que, à 11,5 GHz et 14,2 GHz, l'amplitude logarithmique varie en fonction du rapport de fréquence à la puissance  $0,35 (f^{0,35})$  [Karasawa et autres, 1988a]. Il faut tenir compte également d'une influence de la fréquence due aux dimensions de l'antenne. Après avoir éliminé l'influence due à l'"effet de formation de moyennes" produit par l'ouverture, on a obtenu pour les fréquences susmentionnées une loi de variation nette en  $f^{0,45}$  en fonction de la fréquence. Cette loi de variation nette, dans le cas d'une réception de signaux sur des antennes suffisamment petites, donne des valeurs un peu inférieures à la valeur théorique de  $f^{7/12}$  que l'on déduit du spectre de Kolmogorov. D'autres valeurs expérimentales sont comprises entre  $f^0$  et  $f^{0,5}$  [Yokoi et autres, 1970; Thompson et autres, 1975; Ortgies et Rücker, 1992].

C'est la raison pour laquelle la méthode de prévision de l'UIT-R utilise la valeur  $f^{7/12}$ , valeur théorique donnée dans l'équation (6.1).

### 6.2.2.3 Influence de l'angle d'élévation

La variation d'amplitude due aux scintillations est proportionnelle à  $(\operatorname{cosec} \theta)^n$ . Dans une expérience [Karasawa et autres, 1988a], on a recueilli des données à long terme pour des angles d'élévation  $\theta$  de  $4,0^\circ$  (satellite à  $57^\circ \text{E}$ ), de  $6,5^\circ$  ( $60^\circ \text{E}$ ), et de  $9,0^\circ$  ( $63^\circ \text{E}$ ), respectivement pendant les mois de septembre et octobre 1985, 1983 et 1982. On a trouvé que la puissance  $n$  du terme  $(\operatorname{cosec} \theta)^n$  était de l'ordre de 1,3, très supérieure à la valeur théorique 11/12. Sur la base de ces données et d'autres données de mesure, le terme  $(\operatorname{cosec} \theta)^{1,2}$  a été adopté pour la méthode de prévision.

### 6.2.2.4 Influence du diamètre d'ouverture de l'antenne

Il est bien connu que l'intensité de la scintillation diminue quand le diamètre d'ouverture augmente, en raison du manque de cohérence du front de l'onde [Tatarskii, 1961]. Ce phénomène porte le nom d'"effet de formation de moyennes" par l'antenne. La formule présentée dans la Recommandation UIT-R P.618 est celle proposée par Haddon et Vilar [1986].

### 6.2.2.5 Fonction de densité de probabilité (FDP) des variations de niveau du signal

L'expérience susmentionnée [Karasawa et autres, 1988a] a donné les résultats suivants:

- 1) La fonction de densité de probabilité des variations d'amplitude (dB) pendant des intervalles de temps relativement courts (environ une heure) obéissait à une distribution gaussienne, avec des scintillations assez fortes dont les fluctuations quadratiques moyennes atteignaient 1,6 dB.
- 2) La distribution de l'écart type lui-même, pour des variations à long terme sur un mois, était très proche d'une distribution gamma; de même, l'écart par rapport à la distribution gamma n'était pas très grand pour une période de variation d'une année.
- 3) On avait la relation suivante entre la moyenne mensuelle,  $m$ , de  $\sigma_\chi$  et l'écart type de  $\sigma_{\sigma_\chi}$  de  $\sigma_\chi$ :  $m^2 = 10\sigma_{\sigma_\chi}^2$ . Cela montre qu'un des deux paramètres indispensables pour déterminer la distribution gamma peut être obtenu directement à partir de l'autre.

Sur cette base, on a établi la formule utilisée dans la Recommandation UIT-R P.618 [Karasawa et autres, 1988b]. La Figure 6.3 montre les variations du facteur ( $\eta$  dans la figure) en fonction de pourcentage de temps, pour l'évanouissement et pour le renforcement du signal. La courbe en tirets a été utilisée dans l'élaboration de la méthode de la Recommandation UIT-R P.618. Par contre, des expériences faites en Europe à des angles d'élévation de l'ordre de  $30^\circ$  ont montré que la meilleure

approximation de la densité de probabilité de l'écart type pour des variations à long terme (point 2 ci-dessus) est donnée par une distribution log normale corrigée du bruit du récepteur [Ortgies, 1989; Haddon et Vilar, 1986].

### 6.2.2.6 Influence de la polarisation

On constate une bonne corrélation temporelle entre les fluctuations mesurées simultanément avec une même antenne sur deux fréquences différentes. Des mesures faites avec deux polarisations différentes montrent que la scintillation est indépendante de la polarisation [Cox, 1981].

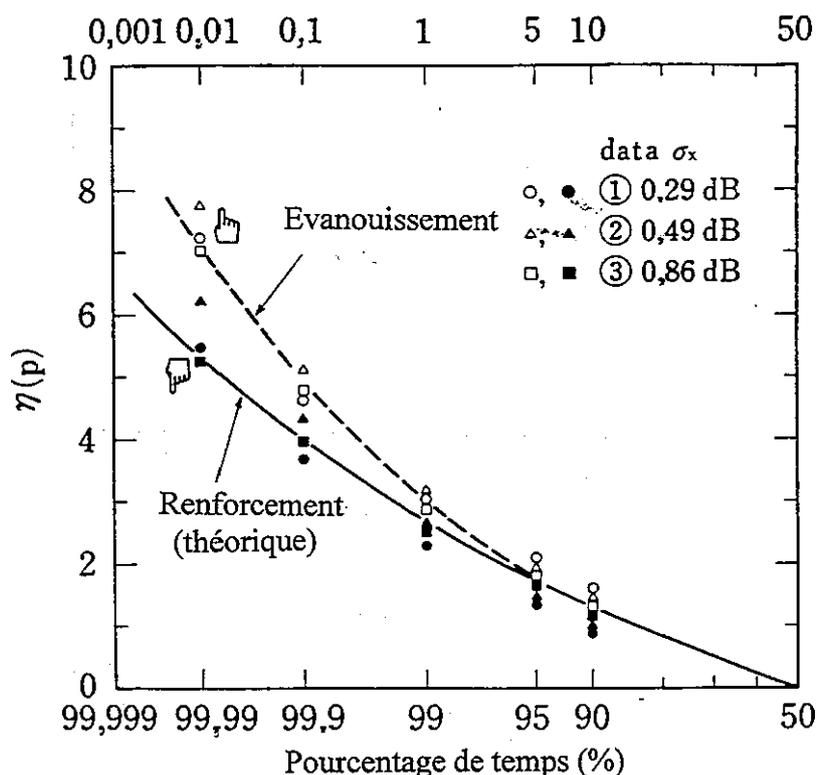


FIGURE 6.3

Facteur de pourcentage de temps pour l'évanouissement et le renforcement du signal

### 6.2.3 Précision et champ d'application de la méthode de prévision

#### 6.2.3.1 Précision et champ d'application de la prévision de la fluctuation quadratique moyenne

Pour évaluer l'exactitude de la méthode de prévision de l'UIT-R, on a considéré des résultats expérimentaux recueillis dans plusieurs régions climatiques différentes.

Le diagramme de la Figure 6.4 montre la dispersion entre les valeurs mesurées et les valeurs prévues pour un certain nombre de conditions [Karasawa et autres, 1988b]. L'intervalle de variation des paramètres est 7,3 - 14,2 GHz pour la fréquence, 4° - 30° pour l'angle d'élévation et différentes régions climatiques. On peut admettre que le modèle est applicable aux fréquences supérieures à 20 GHz. En revanche, aux angles d'élévation inférieurs à 4°, on peut s'attendre à des évanouissements inhabituellement profonds du signal, provoqués par des irrégularités de l'indice de réfraction. Il faut par conséquent procéder avec prudence lorsqu'on applique le modèle à des cas où les angles d'élévation sont très petits (voir le § 6.2.4).

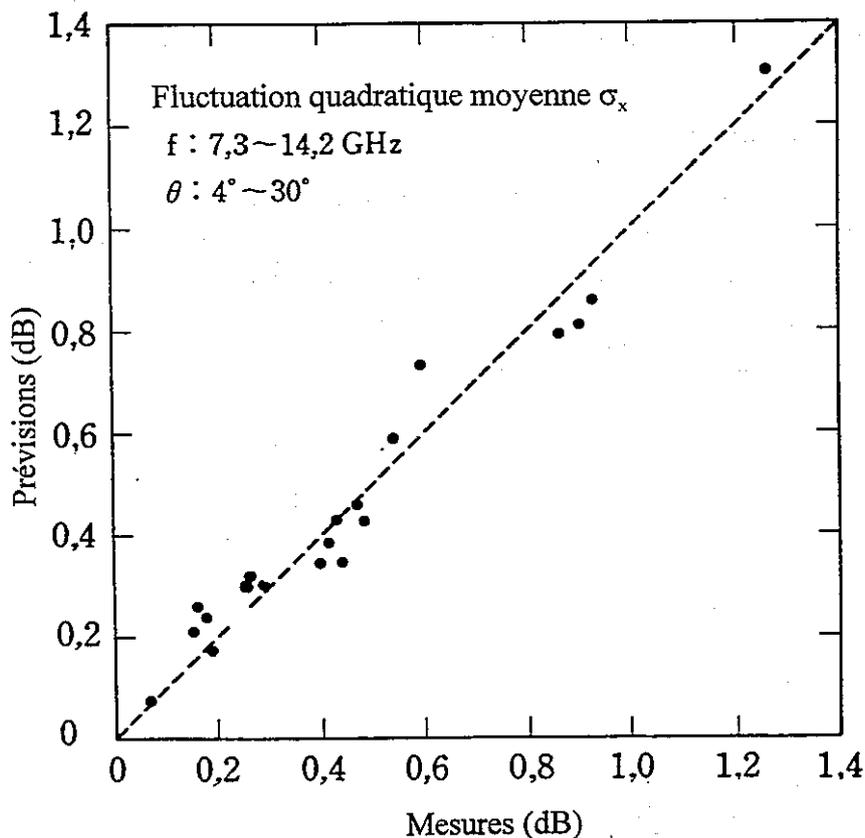


FIGURE 6.4

**Diagramme de dispersion de la fluctuation quadratique moyenne entre les mesures et les prévisions, pour un certain nombre de conditions (pour plus de détails, voir Karasawa et autres [1988b])**

### 6.2.3.2 Précision et champ d'application de la fonction de densité de probabilité (FDP)

On a pu confirmer que des résultats obtenus au Japon et au Royaume-Uni donnaient des prévisions d'une très bonne exactitude [Karasawa et autres, 1988b; Lo et autres, 1984; Banjo et Vilar, 1986]. Cependant, on ne dispose pas encore d'une quantité suffisante de données pour effectuer des tests complets du modèle. De surcroît, il n'existe actuellement qu'un petit nombre de données pour les faibles angles d'élévation (notamment au-dessous de  $4^\circ$ ), de telle sorte qu'on n'est pas sûr de pouvoir appliquer le modèle aux cas avec de très petits angles d'élévation.

On peut donc admettre que le modèle proposé dans la Recommandation UIT-R P.618 donne des prévisions précises pour les évanouissements par scintillation se produisant sur les trajets Terre-espace à des angles d'élévation supérieurs à environ  $4^\circ$ . Pour les angles inférieurs à  $4^\circ$ , on trouvera une méthode de prévision empirique aux § 2.4.2 et 2.4.3 de la Recommandation UIT-R P.618.

### 6.2.4 Variations du signal à des angles d'élévation inférieurs à $5^\circ$ environ

L'affaiblissement par réfraction en atmosphère claire augmente rapidement à mesure que diminue l'angle d'élévation du trajet. A des angles d'élévation inférieurs à  $5^\circ$  environ, les effets de la propagation par trajets multiples dus à la stratification troposphérique et à d'éventuelles réflexions sur la surface deviennent de plus en plus importants et se produisent parallèlement aux phénomènes de défocalisation (§ 6.1) et de scintillation d'amplitude (§ 6.2.1). Le mécanisme de propagation

résultant de cette combinaison complexe de phénomènes est connu sous le nom d'évanouissement à de faibles angles. Un modèle empirique permettant de prévoir les statistiques d'évanouissement pour des angles d'élévation inférieurs à  $5^\circ$  a été élaboré [Olsen, 1995]; il est décrit aux § 2.4.2 et 2.4.3 de la Recommandation UIT-R P.618.

#### 6.2.4.1 Modèle empirique

La méthode de l'UIT-R permet de prévoir la distribution des évanouissements par réfraction sous de petits angles,  $A_{ref}(p)$ , résultant des effets de la défocalisation (étalement des faisceaux) de la scintillation et de la propagation par trajets multiples. Les conditions climatiques et le relief sont pris en compte par un facteur géoclimatique  $K_w$ , fonction d'un facteur de latitude  $C_{lat}$  et d'un paramètre  $C_0$  rapportés aux conditions prévalant sur la partie la plus touchée du trajet de propagation. Des calculs sont tout d'abord faits pour le mois moyen le plus défavorable, calculs à partir desquels on peut aussi obtenir des statistiques pour l'année moyenne. La partie de la distribution correspondant aux évanouissements peu profonds est basée sur une interpolation entre la profondeur des évanouissements dépassée pendant 63% du mois moyen le plus défavorable ou de l'année moyenne et le pourcentage du temps pendant lequel la profondeur des évanouissements dépasse 25 ou 35 dB (selon le comportement du modèle).

Étant donné que les évanouissements sur les trajets Terre-espace sous de petits angles se comportent de la même façon que les évanouissements dus au phénomène de propagation sur les trajets de Terre par trajets multiples, on a élaboré le modèle combinant les données limitées dont on disposait concernant les évanouissements sous de petits angles et les données beaucoup plus importantes dont on disposait sur les évanouissements dus à la propagation par trajets multiples que l'on observe sur les liaisons de Terre. Les données sous de petits angles mesurées à une fréquence de 7,3 GHz pour un angle d'élévation compris entre  $1^\circ$  et  $4^\circ$  à Ottawa [McCormick et Maynard, 1972; Webber et McCormick, 1980] et à Alert à 38 GHz [Lam, 1987] ont permis d'établir l'influence de l'angle d'élévation. Les données recueillies à 4 et 30 GHz à St. John's [Webber et McCormick, 1980] utilisent la même loi de variation en fonction de la fréquence pour les évanouissements dus à la propagation par trajets multiples que celle utilisée pour les liaisons de Terre (Recommandation UIT-R P.530). Les données recueillies à Ottawa ( $45^\circ$  N,  $75^\circ$  O), à Alert ( $83^\circ$  N,  $62^\circ$  O) ainsi que des données à  $1^\circ$  pour Eureka ( $80^\circ$  N,  $86^\circ$  O) [Strickland et autres, 1977; Kurniawan, 1986], les données à  $3,3^\circ$  pour Goonhilly ( $50^\circ$  N,  $5^\circ$  O) [Bryant, 1992] et les données à  $3,2^\circ$  pour Isfjord ( $78^\circ$  N,  $13,6^\circ$  E) [Gutteberg, 1983] donnent de nouveaux éléments qui viennent confirmer la loi de variation en fonction de l'angle d'élévation et de la fréquence et constituent également un test donnant à penser qu'il est raisonnable d'utiliser la même variabilité climatique pour les évanouissements dus à la propagation par trajets multiples que pour les évanouissements sur les liaisons de Terre. Le diamètre des antennes utilisées pour les mesures était compris entre 0,45 m et 9 m, ce qui couvre une large gamme des antennes susceptibles d'être utilisées dans la pratique.

Les caractéristiques du modèle sont illustrées à la Figure 6.5 dans laquelle on compare les distributions des valeurs mesurées et prévues des évanouissements pour le mois défavorable en atmosphère claire à Alert sous différents angles d'élévation. Lorsque les résultats obtenus avec la méthode ont été comparés aux données concernant les trajets caractérisés par de très petits angles d'élévation, l'écart moyen et l'écart type de l'erreur de prévision s'établissaient respectivement à 0,4 dB et 5,3 dB, si l'on utilise l'interpolation et l'extrapolation avec l'échelle logarithmique décrites au § 6.2.4.1.2 pour obtenir le facteur de prévision climatique requis  $p_L$  [Olsen, 1995]. Toutefois, étant donné que la base de données n'est pas très riche et que la plupart de ces données ont été utilisées pour élaborer la méthode, on peut s'attendre à ce que les erreurs de prévision soient beaucoup plus importantes. A titre de comparaison, l'écart type de l'erreur de prévision calculé à

partir d'un ensemble de données de propagation sur des trajets de Terre beaucoup plus important est de 3,6 dB [Olsen et Tjelta, 1996].

On trouvera dans les deux paragraphes ci-après de plus amples détails sur le modèle.

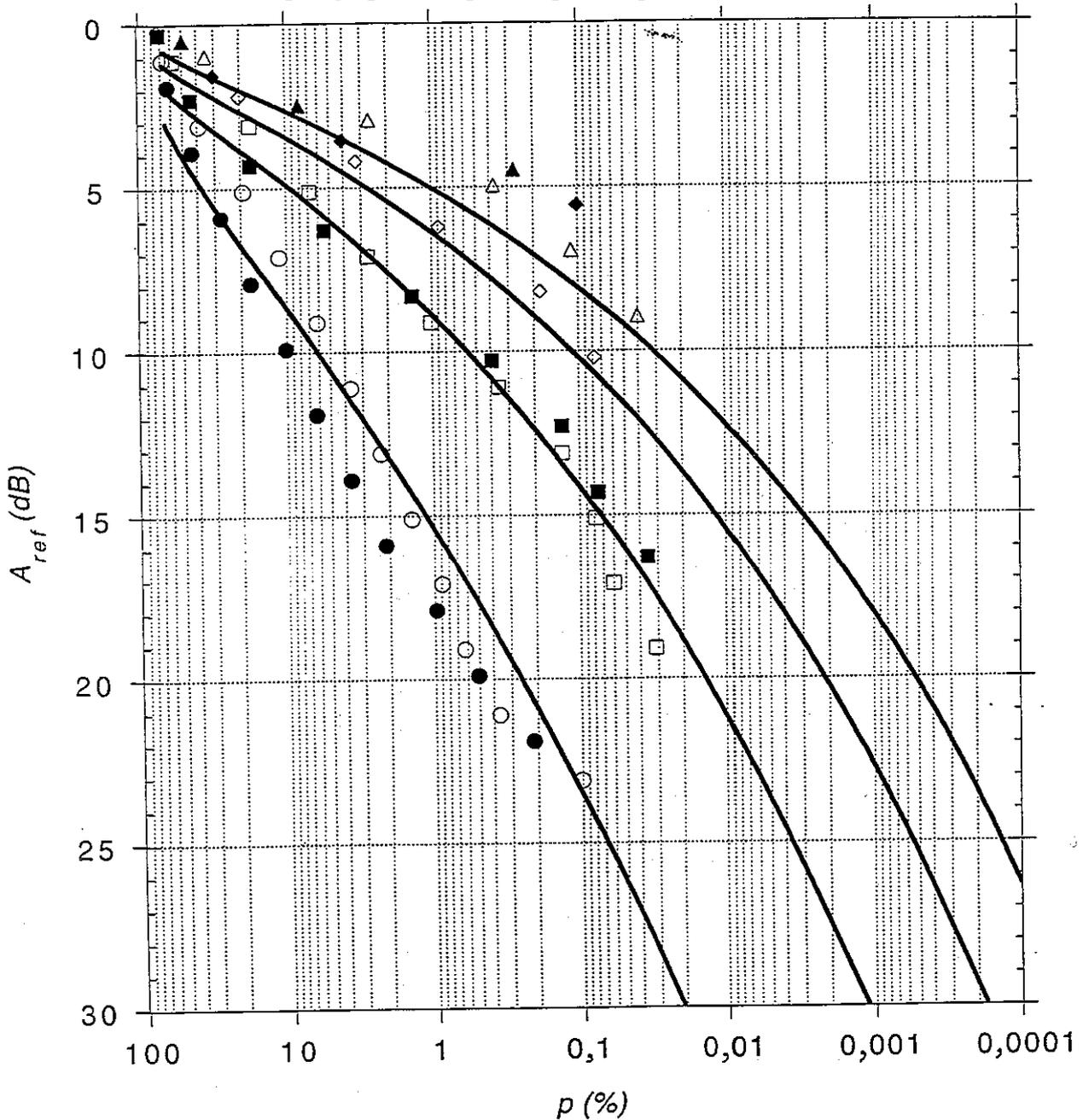


FIGURE 6.5

**Comparaison des distributions des évanouissements pour le mois le plus défavorable en atmosphère claire mesurées et prévues pour Alert**

Données mesurées pour les angles d'élévation précis: ○, ● 1,5°; □, ■ 2,5°; ◇, ◆ 3,5°; △, ▲ 4,5°. Les points clairs et ombrés représentent différents ensembles donnés pour les angles choisis.

— Distributions prévues (basées sur  $p_L = 0,37\%$  et déterminées par extrapolation en utilisant une échelle logarithmique; Figure 9 de la Recommandation UIT-R P.453).

Le pourcentage de temps mensuel maximal dépassé à chaque seuil d'évanouissement définit la distribution correspondant au mois le plus défavorable pour chaque angle d'élévation.

#### 6.2.4.1.1 Affaiblissement dû à l'étalement des faisceaux

L'équation (23) de la Recommandation UIT-R P.618 qui donne l'affaiblissement dû à l'étalement des faisceaux  $A_{bs}$  sur des liaisons situées à des latitudes faibles ou moyennes est un ajustement par régression de la courbe  $A$  de la Figure 1 de la Recommandation UIT-R P.834 pour des angles d'élévation de  $1,5^\circ$ ,  $2,5^\circ$  et  $3,5^\circ$  [Crane, 1971]; on considère qu'elle est typique de l'affaiblissement médian sur le long terme par étalement des faisceaux pour des emplacements à l'intérieur des terres. Des données indiquent que  $A_{bs}$  est beaucoup plus important à des latitudes élevées pendant les mois chauds de l'année [Lam, 1987; Kurniawan, 1986]. Par conséquent, la pente de l'équation 24 de la Recommandation UIT-R P.618 est basée sur une adaptation par régression des profondeurs d'évanouissement médianes pour le mois le plus défavorable pour des emplacements situés à des latitudes élevées, après soustraction de l'affaiblissement atmosphérique estimé selon la méthode de la Recommandation UIT-R P.676.

#### 6.2.4.1.2 Distribution des évanouissements

Les équations (38) et (39) de la Recommandation UIT-R P.618 reposent sur les hypothèses, étayées par des évaluations de modèles, que les évanouissements les plus profonds sont imputables aux phénomènes de propagation par trajets multiples et que la distribution des évanouissements est décrite de façon approximative par un modèle semblable à celui utilisé pour les trajets de Terre dans la méthode 1 de la Recommandation UIT-R P.530. Dans ces équations, les termes correspondant à la fréquence sont les mêmes que ceux utilisés dans la méthode 1 après arrondissement. Les données pour les trajets Terre-espace à 4 et 30 GHz [Webber et McCormick, 1980] viennent conforter le modèle tout comme les résultats d'essais basés sur des données pour les fréquences comprises entre 6 et 38 GHz. On a combiné le terme correspondant à la longueur du trajet dans la méthode 1 à une expression de l'inclinaison du trajet pour obtenir les termes correspondant à l'angle d'élévation dans les équations (38) et (39).

Le facteur géoclimatique  $K_w$  pour le mois moyen le plus défavorable donné dans l'équation (33) de la Recommandation UIT-R P.618 tient compte des effets climatiques, en particulier de la présence variable de couches atmosphériques présentant des gradients d'indice de réfraction extrêmes. Même si  $K_w$  devrait en principe tenir compte de l'influence des couches en surface et des couches plus élevées, la variable  $p_L$  (applicable dans les 100 derniers m les plus bas de l'atmosphère) donne de bons résultats avec cette méthode. A la différence des trajets de Terre, on a constaté que pour les trajets Terre-espace un facteur de correction distinct pour les grandes étendues d'eau n'était pas nécessaire. L'expression empirique utilisée dans la méthode pour le facteur géoclimatique logarithmique  $G_a$  correspondant à l'année moyenne est basée en partie sur des données relatives à des trajets de Terre et en partie sur des données relatives à des trajets Terre-espace. La partie correspondant aux évanouissements peu profonds des distributions cumulatives observées est en bon accord avec la même relation empirique pour les évanouissements peu profonds utilisée pour les liaisons de Terre.

On utilise les cartes des Figures 7 à 10 de la Recommandation UIT-R P.453 pour déterminer la variable  $p_L$  de l'équation (33) de la Recommandation UIT-R P.618. Des tests du modèle [Olsen, 1995] montrent que les valeurs les mieux adaptées pour  $p_L$  sont obtenues par interpolation avec échelle logarithmique entre les contours des cartes ou, si on a besoin de valeurs de  $p_L$  pour des pourcentages de temps inférieurs à 1%, par extrapolation avec échelle logarithmique des deux contours les plus proches.

Il peut être souhaitable dans certains cas d'obtenir des expansions des cartes de la Recommandation UIT-R P.453, dans la zone de la liaison considérée et de tracer précisément le point correspondant à l'emplacement de la station terrienne pour obtenir la valeur de  $p_L$ . Étant donné que les cartes sont sur une projection de Mercator, il convient d'utiliser la relation suivante pour tracer la latitude  $\xi$  de l'emplacement:

$$\Delta z_L = \Delta z \left[ \frac{\ln[\operatorname{tg}(45^\circ + 0,5\xi)] - \ln[\operatorname{tg}(45^\circ + 0,5\xi_1)]}{\ln[\operatorname{tg}(45^\circ + 0,5\xi_2)] - \ln[\operatorname{tg}(45^\circ + 0,5\xi_1)]} \right] \quad (6.2)$$

où  $\Delta z$  est la distance (par exemple en mm) entre les lignes de la grille de latitude inférieure et supérieure les plus proches respectivement pour des latitudes  $\xi_1$  et  $\xi_2$  (par exemple  $30^\circ$  et  $45^\circ$ ) et  $\Delta z_L$  est la distance requise (par exemple en mm) entre la ligne de la grille de latitude inférieure et le point correspondant à la station de Terre. La longitude de l'emplacement peut être calculée par interpolation linéaire.

#### 6.2.4.2 Caractéristiques des évanouissements sous de petits angles

La méthode de prévision de l'UIT-R donne des statistiques d'affaiblissement cumulatives. On peut illustrer d'autres caractéristiques d'affaiblissement à de petits angles par référence à des données de mesure. Par exemple, lors de mesures effectuées à Isfjord à un angle de site de  $3,2^\circ$ , on a constaté que les statistiques d'affaiblissement suivaient des distributions de Nakagami-Rice (voir la Recommandation UIT-R P.1057) avec, comme rapport de puissances entre la composante aléatoire et la composante déterministe, des valeurs de -20 dB, -13 dB et -10 dB respectivement, pour le mois le plus favorable, le mois le plus défavorable et le jour le plus défavorable [Guttenberg, 1981].

Des statistiques sur la dynamique des évanouissements pour des données à 6 GHz mesurées au Canada sur un trajet caractérisé par un angle d'élévation de  $1^\circ$  [Strickland et autres, 1977] ont indiqué que 90% des évanouissements dépassant 20 dB duraient moins de 11 secondes environ et que 90% des évanouissements dépassant 12 dB duraient moins de 35 secondes environ. La rapidité de variation du niveau du signal dépassait 1 dB/s pendant 1% du temps et 4 dB/s pendant 0,1% du temps. On dispose également de statistiques sur la rapidité de variation ont été obtenues pour 4 et 30 GHz [Webber et McCormick, 1980] ainsi que pour 38 GHz [Lam, 1987]. (Il faut noter que les mesures de la vitesse de variation dépendent étroitement de l'échantillonnage et du filtrage des données. En conséquence, si l'on veut faire des comparaisons, il faut s'assurer que les conditions de mesure étaient identiques.)

La diversité d'emplacement peut contribuer à réduire les marges de protection contre les évanouissements à respecter pour les liaisons Terre-espace fonctionnant sous de très petits angles d'élévation. Plusieurs mesures ont été faites. Dans la bande des 6 GHz, on a observé une bonne amélioration avec une séparation verticale de 180 m entre les stations mais pour un espacement horizontal, les résultats n'ont pas été concluants [Strickland et autres, 1977]. Dans un autre cas, on a constaté un bon fonctionnement avec un espacement horizontal de 300 m [McCormick et Maynard, 1972] tandis que dans un autre cas, avec une séparation de 500 m, l'amélioration a été faible [Strickland, 1981]. Des mesures de diversité d'emplacement effectuées à Isfjord (Norvège) à un angle d'élévation de  $3,2^\circ$  [Guttenberg, 1983] révèlent une réduction sensible des évanouissements simultanés par rapport à ceux qui se produisent en un emplacement unique. On ne sait pas si cela est dû à la distance latérale des deux emplacements (1 150 m) ou à leur différence d'altitude relative vue du satellite.

On a utilisé les données de diversité pour Eureka [Strickland, 1981] pour concevoir un système fonctionnant à 6/4 GHz avec diversité d'emplacement. Des mesures effectuées par la suite sur une période de près de 9 mois, pour caractériser les performances de ce système sur ces trajets ont permis de constater la présence d'évanouissements par réfraction importants pendant l'été et ont montré que la diversité d'emplacement permet de diminuer considérablement la durée d'indisponibilité au trajet. Cette technique de diversité d'emplacement pour les évanouissements par réfraction est semblable à celle utilisée pour remédier aux effets des interruptions dues à l'affaiblissement causé par la pluie (voir le § 3.3.1); à noter cependant que l'échelle est ici différente, en raison de la nature des mécanismes physiques qui interviennent.

### 6.3 Retards de propagation

La réfraction à travers la troposphère, la pluie et les effets ionosphériques sont la cause de retards de propagation additionnels qui se superposent au retard dû à la propagation en espace libre. La Recommandation UIT-R P.834 donne une méthode permettant d'évaluer le temps de propagation moyen (et la variation du retard) dû à la troposphère. Aux fréquences supérieures à 10 GHz, le temps de propagation est généralement plus petit dans l'ionosphère que dans la troposphère (voir le § 7.3.2).

Pour déterminer des distances avec une précision de l'ordre du centimètre, il faut analyser avec soin les diverses contributions à l'erreur de distance. On constate que la source d'erreur la plus importante est la vapeur d'eau, qui introduit une erreur de 10 cm dans le cas d'un trajet passant au zénith et d'une atmosphère de référence dans laquelle la teneur en vapeur d'eau au sol est de  $7,5 \text{ g/m}^3$  (hauteur d'échelle, 2 km). Il en est ainsi de même pour une atmosphère sèche qui ajoute une erreur de distance de 2,3 m dans le cas d'un trajet passant au zénith [Flock et autres, 1982].

Le retard de propagation moyen et sa variance dans une atmosphère sans précipitation peuvent se calculer à partir de la relation de régression entre le coindice de réfraction à la surface de la Terre et l'erreur sur la distance, relation qui a été établie aux Etats-Unis [Bean et Dutton, 1966]. Des précisions sur les méthodes, notamment les méthodes pour estimer la variance de l'erreur sur le temps de propagation, se trouvent dans un autre document [Nuspl et autres, 1975].

La plupart des statistiques sur le coindice en surface sont des statistiques mensuelles; en revanche, il est possible d'obtenir des estimations de l'écart type pour un intervalle de temps quelconque en combinant ses estimations mensuelles avec le spectre de fréquences semi-empirique du temps de propagation. Des courbes de  $\sigma_{\Delta\tau}$  sur un trajet aller-retour espace vers Terre sont tracées sur la Figure 6.6 en fonction de la "fréquence de coupure",  $f_c = 1/T$  et pour des écarts types mensuels de 10, 20 et 30 unités  $N$ ;  $f_c$  est la fréquence au-dessous de laquelle les fluctuations du temps de propagation sont de plus en plus amorties, du fait que la durée de la période d'observation  $T$  est finie. On a pris comme hypothèse un angle d'élévation type  $\theta = 30^\circ$ , une longueur de trajet équivalente de 10 km et des moyennes de la composante normale au trajet de la vitesse du vent,  $U = 2, 5$  et  $10 \text{ m/s}$ . Pour des angles d'élévation autres que  $30^\circ$ , les valeurs lues sur les courbes et les vitesses de vent indiquées doivent être divisées par  $(2 \sin \theta)$ . On peut admettre que la distribution des fluctuations du temps de propagation est du type gaussien.

Les courbes de la Figure 6.6 sont fondées sur un spectre de fréquences moyen et ne sont pas représentatives de la distribution des variations extrêmes qui peuvent se produire. Une limite supérieure approximative pour les courtes durées de la période d'observation  $T$  est donnée par  $\sigma_{\Delta\tau} \approx 0,25/\sin \theta$  (ns) si  $\theta \geq 10^\circ$ .

Pour estimer la variation du retard se produisant lorsqu'une cellule de pluie coupe le trajet de propagation, on peut appliquer une méthode voisine de celle utilisée pour calculer l'affaiblissement [Nuspl et autres, 1975] sur les fréquences inférieures ou égales à environ 15 GHz. Comme la variation du retard est de l'ordre de 0,2 ns, on peut généralement négliger la variation du retard due à la pluie.

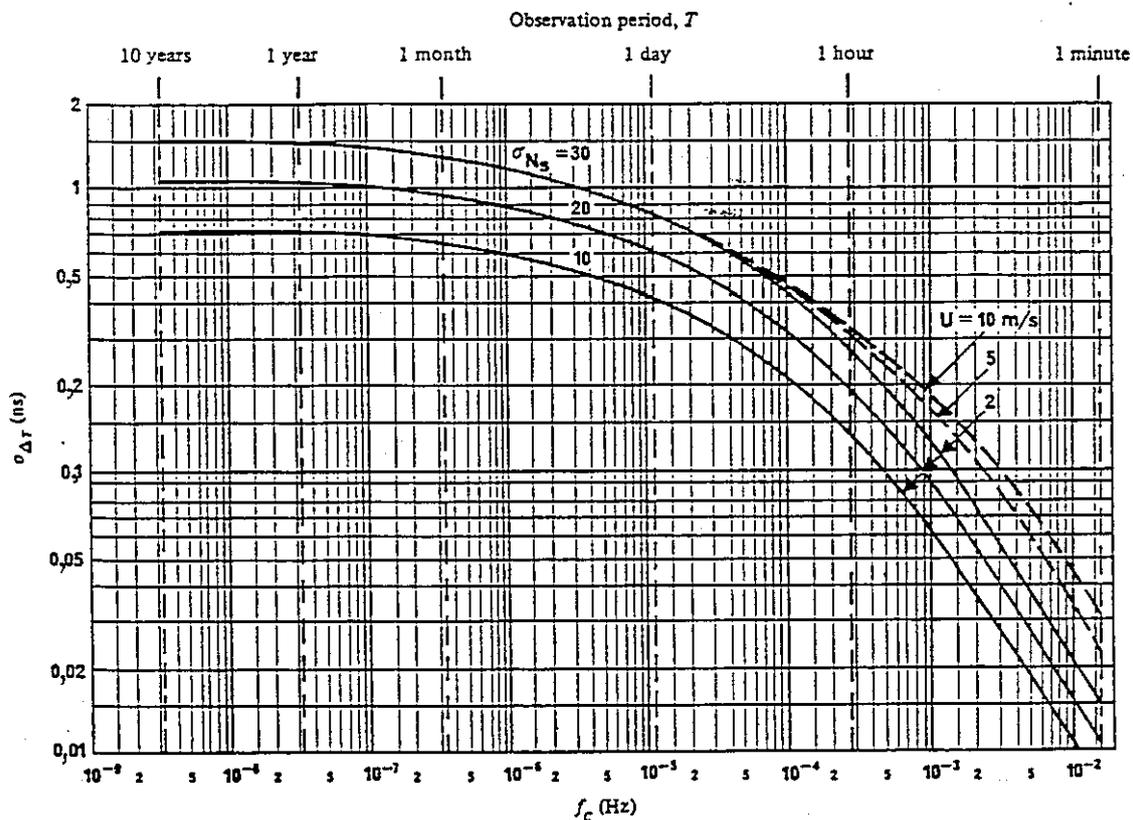


FIGURE 6.6

Variation cumulative de  $\sigma_{\Delta\tau}$  en fonction de la fréquence, pour un trajet aller-retour Terre-espace à un angle de site de  $30^\circ$ . Chaque courbe correspond à une valeur donnée de  $\sigma_{N_s}$  écart type de  $N_s$  pour un mois

#### 6.4 Angle d'arrivée

Le gradient de l'indice de réfraction de l'atmosphère a pour effet de causer une courbure du rayon radioélectrique, ce qui fait que l'angle d'arrivée varie par rapport à la valeur calculée sur la base de la géométrie du trajet. Étant donné que cet indice varie beaucoup en fonction de l'altitude, la variation de l'angle d'arrivée est beaucoup plus importante en site qu'en azimut. De plus, les irrégularités de l'indice de réfraction peuvent causer des scintillations de l'angle d'arrivée. Ces deux phénomènes s'atténuent sensiblement avec l'angle d'élévation et sont en général négligeables pour des angles d'élévation de plus de  $10^\circ$ . Ils sont indépendants de la fréquence.

Les données publiées relatives aux mesures des variations de l'angle d'arrivée ne sont pas exhaustives. La Recommandation UIT-R P.618 (§ 7) donne des valeurs types des variations de l'angle d'arrivée dues à la réfraction et aux fluctuations à court terme liées aux turbulences. Les causes physiques sont examinées plus en détail dans la Recommandation UIT-R P.834 et du Chapitre 4 du Manuel de l'UIT-R sur la radiométéorologie. Une analyse des variations à court terme est donnée dans [Fukuchi et autres, 1988].

Pour de très petits angles d'élévation, dans certaines conditions météorologiques, il faudra peut-être tenir compte des phénomènes de conduits. La Recommandation UIT-R P.834 et le Manuel de l'UIT-R sur la radiométéorologie donnent des modèles de prévision et des renseignements de base.

RÉFÉRENCES POUR LE CHAPITRE 6

- BANJO, O.P. et VILAR, E. [1986] Measurement and modeling of amplitude scintillations on low-elevation Earth-space paths and impact on communication systems, *IEEE Trans. Commun.*, Vol. COM-34, 8, 774-780.
- BEAN, B.R. et DUTTON, E.J. [1966] *Radio Meteorology*, Dover Publications, New York, USA.
- BRYANT, D.L. [1992] Low elevation angle 11 GHz beacon measurements at Goonhilly Earth station. *BT Technol. J.*, vol. 10, pp. 68-75.
- COX, D.C. [1981] Depolarization of radio waves by atmospheric hydrometers on earth-space paths: A review, *Radio Sci.*, Vol. 16, 5, p. 781-812.
- CRANE, R.K. [1971] Propagation phenomena affecting satellite communication systems operating in centimetre and millimetre wavelength bands, *Proc. IEEE*, Vol. 59, 173-188.
- CRANE, R.K. [1976] Low elevation angle measurement limitations imposed by the troposphere: An analysis of scintillation observations made at Haystack and Millstone, MIT Lincoln Lab. Tech. Rep.518, Lexington MA.
- FLOCK, W.L., SLOBIN, S.D. et SMITH, E.K. [1982] Propagation effects on radio range and noise in Earth-space telecommunications, *Radio Sci.* Vol. 17, 6, p. 1411-1427.
- FUKUCHI, H., NAKAMURA, K. OKAMOTO, K. OKUYAMA, T. [1988] Angle-of-arrival fluctuation at 20 GHz on earth-space path, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol.2, p. 671-681.
- GUTTEBERG, O. [1981] Measurement of tropospheric fading and cross-polarization in the arctic using Orbital Test Satellite, IEE Conf. Publ. No. 195, Part 2, 71-75. *IEE Second Int. Conf. Antennas Propagat.*, Heslington, York, Royaume-Uni.
- GUTTEBERG, O. [1983] Low elevation propagation in high-latitude regions. Final Report, ESTEC Contract no 5032/82 NL GM(SC), Norwegian Telecom, Kjeller, Novege, avril.
- HADDON, J. et VILAR, E. [1986] Scattering induced scintillations from clear air and rain on Earth space paths and the influence of antenna aperture, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-34, 8, p. 646-657.
- ISHIMARU, A. [1978] *Wave propagation and scattering in random media*, New York: Academic Press.
- KARASAWA, Y., YASUKAWA, K. et YAMADA, M. [1988a] Tropospheric scintillation in the 14/11 GHz bands on Earth-space paths with low elevation angles, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-36, 4, p. 563-569.
- KARASAWA, Y., YAMADA, M. et ALLNUTT, J.E. [1988b] A new prediction method for tropospheric scintillation on Earth-space paths, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-36, 11, p. 1608-1614.
- KURNIAWAN, Z. [1986] Satellite link performance monitoring - Project Hurricane. Final Report, Telesat Canada, janvier.
- LAM, W.I. [1987] Low angle signal fading at 38 GHz in the high arctic. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. 35, pp. 1495-1499.

- LO, P., BANJO, O.P. et VILAR, E. [1984] Observation of amplitude scintillations on a low elevation Earth-space path, *Electron. Lett.*, Vol. 20, 7.
- McCORMICK, K.S. et MAYNARD, L.A. [1972] Measurements of SHF tropospheric fading along earth-space paths at low elevation angles, *Electron. Lett.*, Vol. 8, 10, p. 274-276.
- NUSPL, P.P., DAVIES, N.G. et OLSEN, R.L. [1975] Ranging and synchronization accuracies in a regional TDMA experiment, *Proc Third Int. Digit. Sat. Comm. Conf.*, Kyoto, Japon.
- OLSEN, R. [1995] Summary of worldwide procedures for the prediction of clear-air fading distributions on very-low-angle satellite links. *Symp. Proc.*, URSI Open Symp. on Wave Propagation and Remote Sensing, Ahmedabad, India, 20-24 de novembre.
- OLSEN, R. et TJELTA, T. [1996] World-wide techniques for predicting the multipath fading distribution on terrestrial LOS links: Background and results of tests. (À publier dans *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 1997).
- ORTGIES, G. [1989] Ein modell zur Beschreibung von Mikrowellenszintillationen mit Hilfe meteorologischer Parameter, *Kleinheubacherberichte* Vol. 32, 309-315.
- ORTGIES, G. et RÜCKER, F. [1992] Frequency-scaling of slant-path amplitude scintillations, *Proc URSI Comm. F Open Symposium*, Ravenscars (Royaume-Uni), 7.8.1-7.8.5.
- RÜCKER, F. et ORTGIES, G. [1985] Diurnal and seasonal variations of OTS amplitude scintillations, *Electron. Lett.*, Vol. 21, 4, p. 143-145.
- STRICKLAND, J.I. [1981] Mesures en diversité d'espace, des évanouissements sous un petit angle de site et comparaison avec un modèle théorique, *Ann. des Télécomm.*, Vol. 36, 7-8, p. 457-463.
- STRICKLAND, J.I, OLSEN, R.O. et WERSTIUK, H.L. [1977] Mesures des évanouissements à faible élévation dans la région arctique du Canada, *Ann. des Télécomm.*, 11-12, p. 530-535.
- TATARSKII, V.I. [1961] *Wave propagation in a turbulent medium* (traduit par R.A. Silverman), New York, McGraw-Hill.
- THOMPSON, M.C., WOOD, L.E., LAMES, H.B. et SMITH, D. [1975] Phase and amplitude scintillation in the 10 to 40 GHz band, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-23, 6, p. 792-797.
- VANDER VORST, A. VANHOENACKER, D. et MERCIER, L. [1982] Fluctuations on OTS-Earth co-polar link against diurnal and seasonal variations, *Electron. Lett.*, Vol. 18, 21, p. 915-917.
- WEBBER, R.V. et McCORMICK, K.S. [1980] Mesure à faible angle de site des signaux des radiobalise du satellite ATS-6 fonctionnant à 4 et à 30 GHz, *Ann. des Télécomm.*, Vol. 35, 11-12, p. 494-500.
- YAMADA, M. et YOKOI, H. [1974] Flux density of celestial radio sources at 15.5 31.6 GHz, *Electron. Comm. Japan*, Vol. 57-B, 3, 79-85.
- YOKOI, H., YAMADA, M. et SATOH, T. [1970] Atmospheric attenuation and scintillation of microwaves from outer space, *Publ. Astronom. Soc. Japan*, 22, 511-524.

## CHAPITRE 7

### PROPAGATION TRANSIONOSPHERIQUE

#### 7.1 Introduction

Les ondes métriques et les ondes à fréquence plus élevée sont capables de pénétrer dans l'ionosphère, réalisant ainsi des communications transionosphériques. Dans ces communications, les dégradations les plus importantes dues à l'ionisation existante comprennent la rotation de Faraday et le temps de propagation de groupe. Toutes ces dégradations sont liées au contenu électronique total (CET) le long du trajet de propagation. Par ailleurs, la dégradation majeure imputable aux irrégularités est un phénomène généralement appelé scintillation. Tels sont les sujets les plus importants qui seront traités dans ce chapitre.

#### 7.2 Contenu électronique total (CET)

Le contenu électronique total (CET), désigné par le symbole  $N_T$ , a pour expression:

$$N_T = \int_s N_e(s) ds \quad \text{électrons/m}^2 \quad (7.1)$$

où  $N_e$  est la densité électronique (en  $\text{m}^{-3}$ ) le long du trajet et  $s$  la longueur du trajet de propagation en mètres.  $N_T$  varie le plus souvent entre 1 et 200 unités CET (1 unité CET =  $10^{16}$  électrons/ $\text{m}^2$ ). Même lorsque le trajet de propagation est connu avec précision, l'évaluation de  $N_T$  est une opération difficile, parce que  $N_e$  varie considérablement dans l'espace et dans le temps [Davies, 1980; Soicher et Gorman, 1985].

Pour les besoins de la modélisation, on spécifie le plus souvent le CET pour un trajet vertical à l'aide de la relation  $N_e(s) ds = N_e(h) \sec \phi dh$ , où  $\phi$  désigne l'angle zénithal du rayon à une altitude ionosphérique moyenne (~400 km). Connaissant la valeur du CET, on peut faire une estimation de la rotation de Faraday et du temps de propagation de groupe pour les applications de communications. Cette estimation est donnée ci-dessous.

#### 7.3 Effets dus à l'ionisation ambiante

##### 7.3.1 Rotation de Faraday

Lorsqu'elle se propage dans l'ionosphère, une onde à polarisation rectiligne y subit une rotation progressive de son plan de polarisation, du fait de la présence du champ géomagnétique et de l'anisotropie du plasma ambiant. La valeur de la rotation de Faraday,  $\Omega$ , dépend de la fréquence de l'onde radioélectrique, de l'intensité du champ géomagnétique et de la densité des électrons dans le plasma, selon la loi:

$$\Omega = \frac{KM}{f^2} N_T \quad (7.2)$$

ou  $K = 2,36 \times 10^4$  (en unités MKS),  $\Omega$  est exprimé en radians,  $M$  est la valeur de  $B_L \sec \phi$  à l'altitude 420 km,  $B_L$  est la composante longitudinale de l'induction magnétique terrestre (en teslas) le long du trajet du rayon,  $\phi$  désigne l'angle zénithal du rayon et  $f$  la fréquence en hertz. La Figure 7.1 donne des valeurs types de  $\Omega$  en fonction de la fréquence pour des valeurs représentatives du CET.

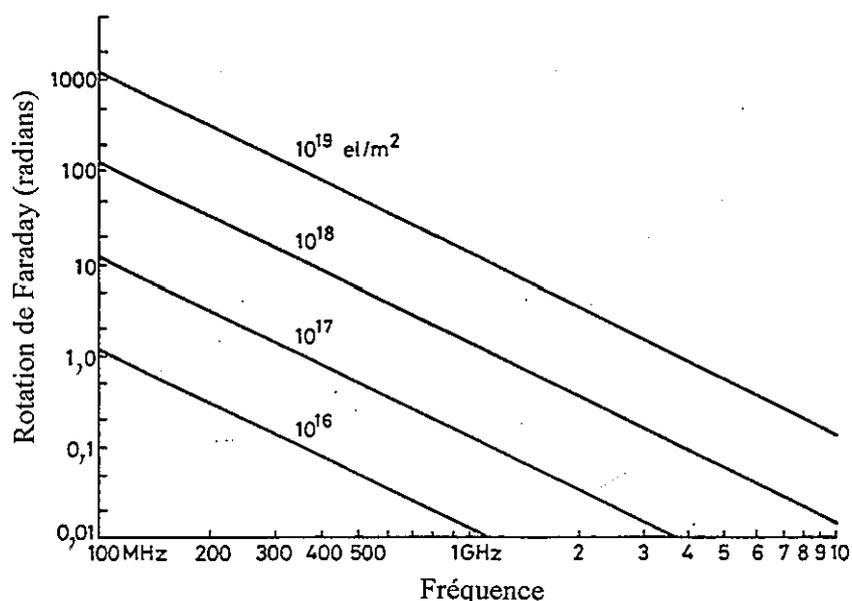


FIGURE 7.1

**Rotation de Faraday en fonction du CET et de la fréquence**

Le Tableau 7.1 donne les valeurs de la rotation de Faraday (degrés) qui seraient dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués, à la fréquence 1 GHz, pendant une année d'observation complète, respectivement au maximum d'activité solaire ( $R_{12} = 157$ ) et au minimum ( $R_{12} = 42$ ).

TABLEAU 7.1

**Valeurs de la rotation de Faraday à 1 GHz dépassées pendant les pourcentages de temps indiqués**

Pourcentage de temps	99	90	50	10	1	0,1	0,01	Période	$R_{12}$
Rotation (degrés)	3	7	23	43	64	75	82	1979-80	157
	1	2	7	14	30	41	47	1977-78	42

**7.3.2 Temps de propagation de groupe**

La présence de particules chargées dans l'ionosphère a pour effet de ralentir la propagation des signaux radioélectriques le long du trajet; elle introduit également une avance de phase. Le délai excédentaire par rapport au temps de propagation en espace libre est appelé temps de propagation de groupe (symbole  $\Delta\tau_g$ ). C'est un paramètre important, dont il faut tenir compte dans les systèmes de communication numériques et les systèmes de repérage en navigation. Cette grandeur a pour expression:

$$\Delta\tau_g = 1,34 \times 10^{-7} N_T / f^2 \tag{7.3}$$

où

- $\Delta\tau_g$  = temps de propagation en secondes, par référence à la propagation dans le vide
- $f$  = fréquence en Hz
- $N_T$  = CET en électrons/m<sup>2</sup>

La Figure 7.2 donne des courbes de variation de  $\Delta\tau_g$  en fonction de la fréquence  $f$ , pour plusieurs valeurs du contenu électronique le long du trajet du rayon.

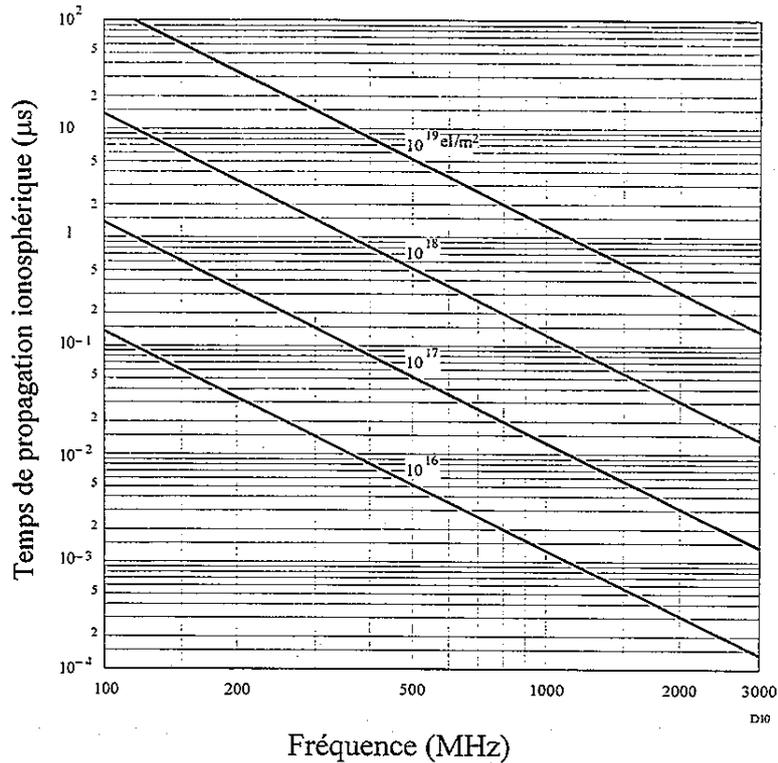


FIGURE 7.2

**Temps de propagation ionosphérique en fonction de la fréquence pour plusieurs valeurs du contenu électronique**

La Figure 7.3 donne le pourcentage annuel des heures diurnes pendant lesquelles le temps de propagation est supérieur à 20 ns durant une période d'activité solaire relativement forte. Pour tracer ces courbes, on s'est servi d'un modèle de CET développé par Bent et autres [1981].

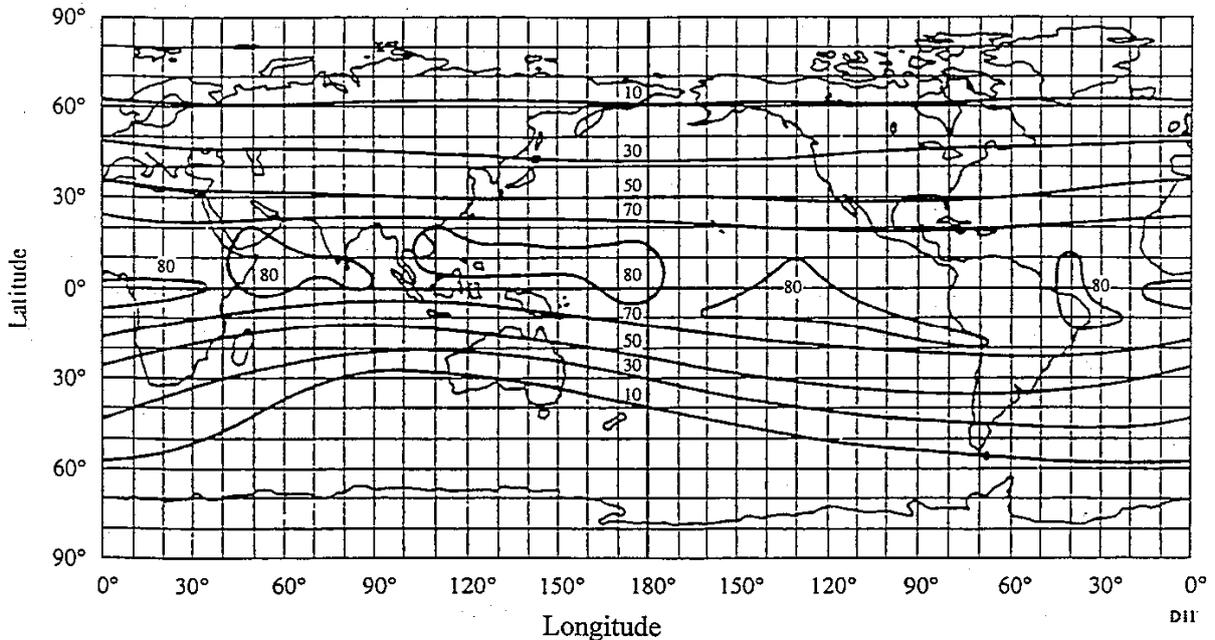


FIGURE 7.3

**Courbes du pourcentage de la moyenne annuelle des heures diurnes pendant lesquelles le temps de propagation sous incidence verticale à 1,6 GHz dépasse 20 ns (nombre de taches solaires = 140)**

### 7.3.3 Dispersion

Lorsque des signaux transionosphériques occupent une large bande de fréquences, la variation du temps de propagation, qui est fonction de la fréquence, se traduit pas une dispersion. Ce temps de propagation différentiel dans la largeur de bande est proportionnel à la densité électronique intégrée le long du trajet. Exemple: pour un contenu électronique de  $5 \times 10^{17}$  électrons dans une colonne de  $1 \text{ m}^2$ , un signal avec une longueur d'impulsion de  $1 \mu\text{s}$  aura un temps de propagation différentiel de  $0,02 \mu\text{s}$  à  $200 \text{ MHz}$ , tandis que ce temps de propagation ne serait que de  $0,00074 \mu\text{s}$  à  $600 \text{ MHz}$  (voir la Figure 7.4) [Millman et Olsen, 1980; Mawira, 1990].

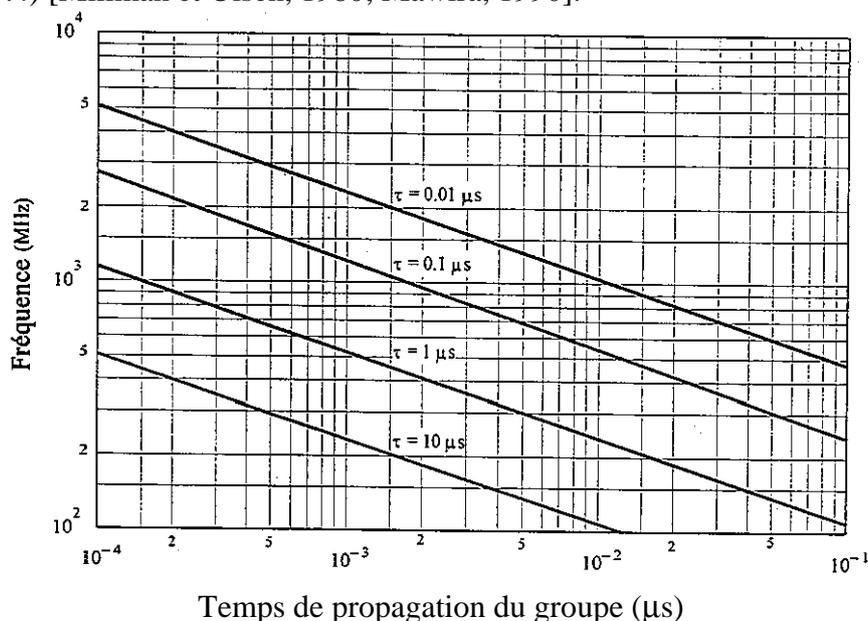


FIGURE 7.4

**Différence de temps de propagation de groupe entre les fréquences inférieure et supérieure du spectre d'une impulsion de largeur  $\tau$  se propageant dans l'ionosphère sur un trajet unidirectionnel**

### 7.3.4 Décalage de fréquence par effet Doppler

Le changement de la fréquence apparente de la porteuse sous l'effet des variations temporelles de l'ionosphère, ou décalage par effet Doppler, est un effet du second ordre. Par exemple, pour  $f = 1,6 \text{ GHz}$  (système GPS), le changement de fréquence observé,  $\Delta f$ , aux latitudes élevées est tel que:

$$\frac{\Delta f}{f} < 10^{-9} \quad (7.4)$$

### 7.3.5 Direction d'arrivée du rayon

Lorsque des ondes radioélectriques se propagent sur des trajets obliques dans l'ionosphère, elles subissent une réfraction qui modifie la direction d'arrivée du rayon.

### 7.3.6 Absorption

Quand on ne dispose pas de renseignements concernant directement l'affaiblissement dû à l'absorption, on peut évaluer cet affaiblissement à partir des modèles disponibles en appliquant la relation en  $(\sec \phi)/f^2$ , pour les fréquences supérieures à 30 MHz,  $\phi$  étant l'angle d'incidence sur l'ionosphère du trajet de propagation [Davies, 1990]. Dans les régions équatoriales et de moyenne latitude, les ondes radioélectriques de fréquence supérieure à 70 MHz traversent l'ionosphère sans subir une absorption notable.

Des mesures effectuées aux latitudes moyennes indiquent que, sur un trajet transionosphérique sous incidence verticale, l'absorption à la fréquence 30 MHz est typiquement de 0,2 à 0,5 dB. Pendant une éruption solaire, l'absorption augmente tout en restant inférieure à 5 dB. Aux latitudes élevées les événements auroraux ou ceux de la calotte polaire peuvent provoquer un renforcement de l'absorption. L'occurrence de ces deux phénomènes est aléatoire, leur durée est variable et leurs effets dépendent de l'emplacement des stations terminales et de l'angle d'élévation du trajet. Pour la conception efficace des systèmes, on doit par conséquent tenir compte de ces phénomènes de façon statistique, en se rappelant que leur durée est de quelques heures pour l'absorption aurorale et de quelques jours pour l'absorption dans la calotte polaire.

#### 7.3.6.1 Absorption aurorale

L'absorption aurorale est due à un accroissement de la concentration électronique dans les régions D et E produite par l'arrivée d'électrons énergétiques. On observe l'absorption sur une bande de latitude de 10° à 20° centrée au voisinage de la latitude d'occurrence maximale des aurores visuelles. Elle se produit sous forme d'une série d'augmentations discrètes de l'absorption, chacune d'une durée relativement courte, de quelques minutes à quelques heures, sa durée moyenne est d'environ 30 mn et elle présente généralement une structure irrégulière dans le temps [Hargreaves et Cowley, 1967]. Les renforcements nocturnes ont tendance à présenter des augmentations rapides et régulières suivies de diminutions lentes. Des magnitudes typiques, à 127 MHz, sont présentées dans le Tableau 7.2.

TABLEAU 7.2

**Absorption aurorale à 127 MHz (dB)**

Pourcentage du temps	Angle d'élévation	
	20°	5°
0,1	1,5	2,9
1	0,9	1,7
2	0,7	1,4
5	0,6	1,1
50	0,2	0,4

#### 7.3.6.2 Absorption dans la calotte polaire

L'absorption dans la calotte polaire se manifeste en des occasions relativement rares, aux latitudes géomagnétiques supérieures à 64° [Bailey, 1964]. Elle est causée par de l'ionisation qui se produit à des altitudes supérieures à 30 km environ. Elle se manifeste sous forme de phénomènes discrets, bien que parfois imbriqués, presque toujours associés à des phénomènes solaires discrets. Cette absorption dure longtemps et se produit au-dessus des calottes polaires éclairées par le Soleil. Elle

se produit généralement lors du maximum d'activité solaire où l'on observe jusqu'à 10 à 12 de ces phénomènes au cours d'une année. Le phénomène peut durer quelques jours, ce qui le différencie de l'absorption aurorale, souvent très localisée et dont les variations durent quelques minutes.

Une caractéristique remarquable du phénomène d'absorption dans la calotte polaire est sa réduction considérable pendant les heures d'obscurité pour un taux de production d'électrons donné.

## 7.4 Effets dus aux irrégularités de l'ionisation

### 7.4.1 Effets de scintillation

La scintillation ionosphérique est la cause d'une des perturbations les plus graves sur un trajet de propagation transionosphérique pour les signaux dont les fréquences s'échelonnent de la bande des ondes métriques jusqu'à la bande C. En raison principalement de la diffusion vers l'avant et de la diffraction, la densité d'ionisation développe des structures irrégulières à petite échelle qui sont à l'origine du phénomène de la scintillation; le signal stable arrivant au récepteur est alors remplacé par un signal qui subit des fluctuations en amplitude, en phase et en direction apparente d'arrivée. Selon la méthode de modulation appliquée dans le système, on obtient diverses variétés de scintillation, qui agissent différemment sur le fonctionnement du système [Yeh et Liu, 1982]. Le paramètre le plus souvent utilisé pour caractériser les fluctuations d'intensité est l'indice de scintillation  $S_4$ , défini comme suit:

$$S_4 = \left( \frac{\langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2}{\langle I \rangle^2} \right)^{1/2} \quad (7.5)$$

où  $I$  désigne l'intensité du signal et le symbole  $\langle \rangle$  un processus de formation de moyennes temporelles [Briggs et Parkin, 1963].

Il existe une relation entre l'indice de scintillation  $S_4$  et les fluctuations de crête à crête de l'intensité. La relation exacte dépend de la distribution de l'intensité, dont la description optimale est donnée par la distribution de Nakagami [Fang et Liu, 1987] pour un large éventail de valeurs de  $S_4$ . Pour  $S_4 \rightarrow 1,0$ , la distribution tend vers celle de Rayleigh. Il peut arriver que  $S_4$  prenne des valeurs supérieures à 1, allant parfois jusqu'à 1,5. Cela est dû à la focalisation. Pour les valeurs inférieures à 0,6,  $S_4$  varie toujours en fonction de la fréquence selon la loi  $f^{-1,5}$  dans la plupart des observations multifréquences faites dans les bandes d'ondes métriques et décimétriques. Cependant, des observations effectuées récemment près de l'équateur dans la gamme des gigahertz ont fait apparaître des valeurs supérieures à 1,5 pour l'indice spectral. Lorsque la scintillation se renforce, avec  $S_4 > 0,6$ , on observe une diminution de l'indice spectral. Ce phénomène s'explique par la saturation de la scintillation pour les évanouissements de type Rayleigh, sous la forte influence de la diffusion multiple.

Le Tableau 7.3 permet d'effectuer empiriquement une conversion commode entre  $S_4$  et les valeurs crête à crête approximatives des fluctuations,  $P_{fluc}$ , en décibels [Fang et Liu, 1987].

TABLEAU 7.3

**Table de conversion empirique pour les indices de scintillation**

$S_4$	$P_{fluc}$
0,1	1,5
0,2	3,5
0,3	6
0,4	8,5
0,5	11
0,6	14
0,7	17
0,8	20
0,9	24
1,0	27,5

#### 7.4.2 Influences géographiques, saisonnières et solaires

Il existe deux zones géographiques où les scintillations sont intenses, l'une située à des latitudes élevées [Hoppe et autres, 1991], l'autre occupant une ceinture de  $\pm 20^\circ$  autour de l'équateur magnétique (voir la Figure 7.5). Dans ces deux zones, on a observé de très fortes scintillations jusqu'aux fréquences de l'ordre des gigahertz, ces scintillations étant maximales dans le secteur équatorial alors qu'aux latitudes moyennes elles affectent principalement les signaux en ondes métriques [Basu et autres, 1988]. Dans tous les secteurs, on observe un maximum nocturne très net de l'activité [Aarons, 1982, 1993].

On observe les changements les plus spectaculaires pendant un cycle d'évolution des taches solaires, aux latitudes polaires et équatoriales, le maximum des taches solaires ayant des effets prononcés dans la région d'anomalie de l'équateur ( $12 - 15^\circ$  par rapport à l'équateur magnétique - voir la Figure 7.5) et dans la région polaire. Dans la région aurorale, les orages magnétiques sont la principale cause des scintillations que l'on observe pendant les différentes parties du cycle d'évolution des taches solaires. Pendant les années de faible activité des taches solaires, les niveaux des évanouissements observés dans la région polaire et la région d'anomalie, sont pour la plus grande partie, peu élevés. Pour les scintillations équatoriales entre 1,5 et 4 GHz, une crête d'activité est illustrée à la Figure 7.6 [Aarons, 1993]. Les fluctuations de crête à crête à l'équateur magnétique sont de l'ordre de 5 à 6 dB pour les années de faible ou de forte activité des taches solaires, à 1,5 GHz. Aux latitudes dans la région d'anomalie, les fluctuations de crête à crête peuvent être de plus de 20 dB pendant les années d'activité maximale des taches solaires. À 4 GHz, les fluctuations de crête à crête du signal radioélectrique ont une amplitude de plus de 10 dB.

S'agissant des caractéristiques temporelles, la fréquence d'évanouissement de la scintillation ionosphérique est comprise entre 0,1 Hz et 1 Hz environ. Un événement de scintillation se produit en général après le coucher ionosphérique local du Soleil et sa durée peut aller de 30 minutes à plusieurs heures. Pour une station équatoriale et pendant les années du maximum d'activité solaire, la scintillation ionosphérique se produit presque tous les soirs après le coucher du Soleil.

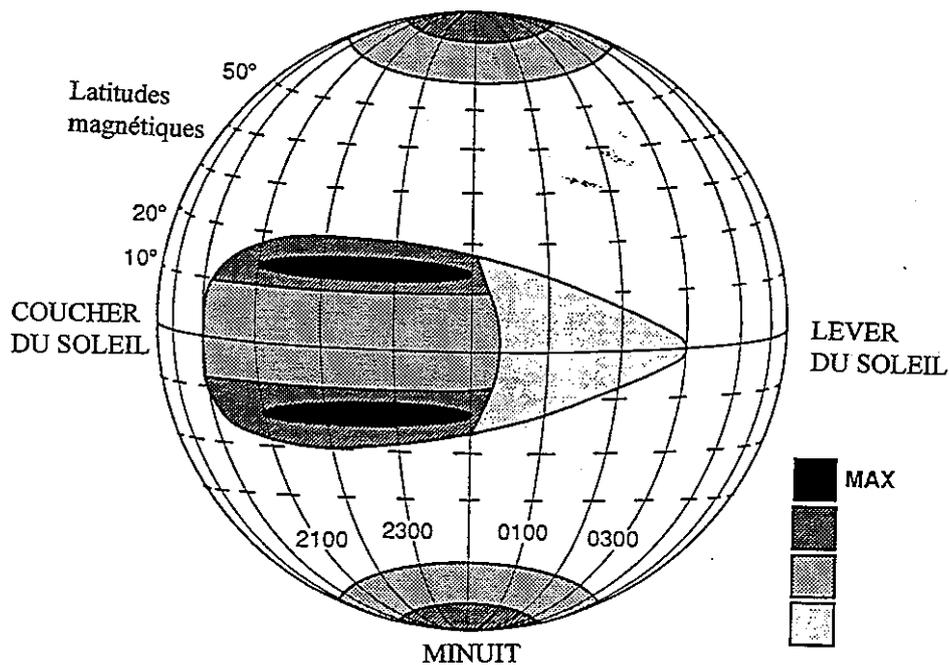


FIGURE 7.5

Illustration de la profondeur des évanouissements pendant les années de forte activité des taches solaires

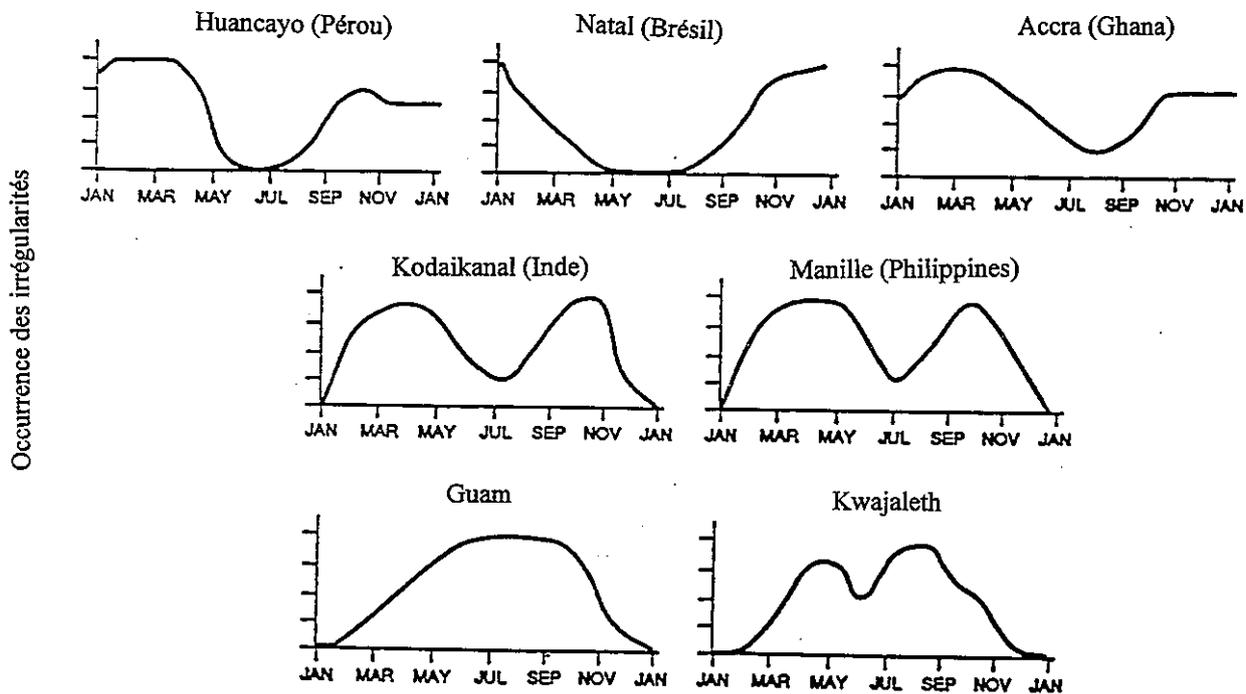
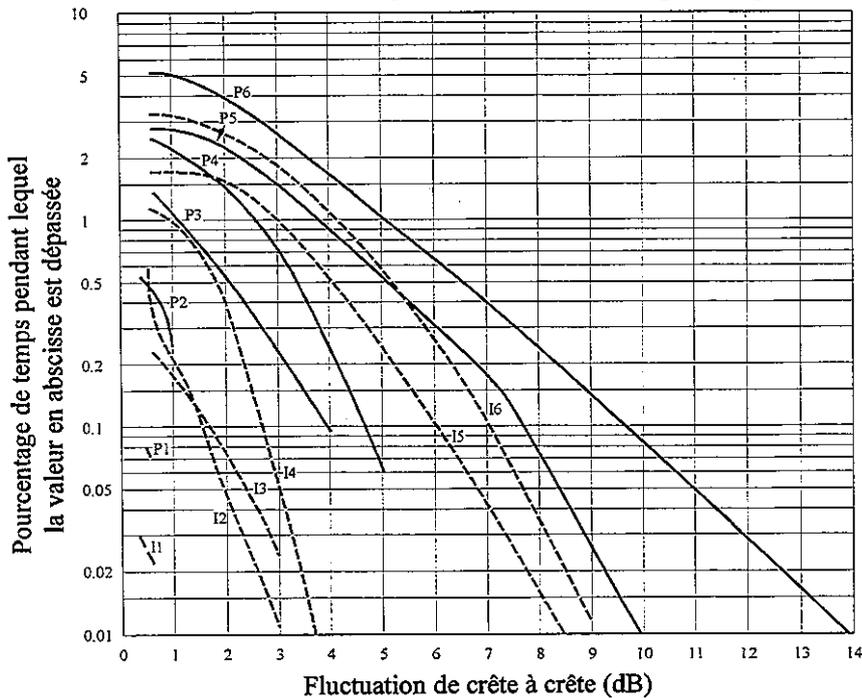


FIGURE 7.6

Occurrence de la scintillation à 1,5 GHz à l'équateur magnétique

### 7.4.3 Modèles de scintillation

Pour modéliser le phénomène de la scintillation, il faut connaître les mécanismes physiques qui génèrent ces irrégularités [Goodman et Aarons, 1990]. Cependant, ce que l'on sait actuellement sur lesdites irrégularités ne suffit pas pour construire un modèle exhaustif. On a émis l'hypothèse selon laquelle les irrégularités liées au phénomène "Fdiffus" seraient à l'origine des scintillations. Ces irrégularités sont des événements qui surviennent essentiellement le soir et pendant la nuit dans la région F. Selon la latitude, l'occurrence du phénomène Fdiffus présente des structures distinctives liées à des variations saisonnières et à des activités magnétiques. Comme ce phénomène est étudié sans interruption depuis le début des années 1930 et que d'énormes quantités de données ont été recueillies, les radiophysiciens ont cherché à élaborer des modèles empiriques pour la prévision des scintillations sur la base de modèles de Fdiffus. Plus récemment, on a construit un modèle fondé sur un grand nombre d'observations de propagation par satellite, dans le cadre du DNA Wideband Satellite Experiment [Secan et autres, 1996]. Avec ces données d'entrée, les modèles rendent compte des variations en fonction de la géographie, de la saison, de l'heure du jour et de l'activité solaire, et aussi en fonction de l'activité magnétique. Il a été démontré que ces modèles permettent d'obtenir de bonnes prévisions des scintillations en ondes décimétriques. Leur élément le plus important est décrit ci-après.



Les courbes *P* se rapportent à une antenne pointée sur un satellite synchrone situé à l'est sous un angle d'élévation de 20°, les courbes *I* à une antenne pointée sur un satellite synchrone situé à l'ouest sous un angle d'élévation de 30°.

Courbe	Période	Nombre de taches solaires
I1,P1	Mars 75-76	10-15
I2,P2	Juin 76-77	12-26
I3,P3	Mars 77-78	20-70
I4,P4	Octobre 77-78	44-110
I5,P5	Novembre 78-79	110-160
I6,P6	Juin 79-80	153-165

FIGURE 7.7

**Statistiques annuelles de la scintillation ionosphérique à 4 GHz observée dans la station terrienne de Hong Kong (courbes I1, P1, I3-I6, P3-P6) et dans la station terrienne de Taipei (courbes P2 et I2)**

La base pour l'élaboration des modèles en question est constituée par des données d'observation recueillies sur de longues périodes. La Figure 7.7 donne un exemple type se rapportant à un trajet ionosphérique équatorial pour la propagation à 4 GHz [Fang et Pontes, 1981]. Cette figure donne les statistiques d'occurrences annuelles des fluctuations de crête à crête,  $P_{fluc}$ , en décibels, pour deux liaisons. Les courbes portent des repères qui correspondent à différentes années durant lesquelles le nombre de taches solaires s'échelonnait entre 10 et 165. Pour calculer le bilan d'une liaison, on utilise la relation suivante entre  $P_{fluc}$  et l'affaiblissement du niveau du signal,  $L_p$ :

$$L_p = \frac{1}{\sqrt{2}} P_{fluc} \quad (7.6)$$

## 7.5 Conclusion

Pour récapituler, le Tableau 7.4 contient la liste des valeurs maximales auxquelles on peut s'attendre pour les effets ionosphériques, à la fréquence 1 GHz. On a supposé que le contenu électronique total d'une colonne de l'ionosphère au zénith était de l'ordre de  $10^{18}$  électrons/m<sup>2</sup>. On a également supposé un angle d'élévation d'environ 30°. Les valeurs indiquées concernent la propagation des ondes dans un seul sens à travers l'ionosphère.

TABLEAU 7.4

**Valeurs maximales estimées des effets ionosphériques à la fréquence 1 GHz  
pour un angle d'élévation d'environ 30° dans le cas  
d'une propagation dans un seul sens**

Effet	Grandeur	Variation en fonction de la fréquence
Rotation de Faraday	108°	1/f <sup>2</sup>
Temps de propagation	0,25 μs	1/f <sup>2</sup>
Réfraction	< 0,17 milliradian	1/f <sup>2</sup>
Variation de la direction d'arrivée	0,2 min d'arc	1/f <sup>2</sup>
Absorption (calotte polaire)	0,04 dB	-1/f <sup>2</sup>
Absorption (aurorale + calotte polaire)	0,05 dB	-1/f <sup>2</sup>
Absorption (latitudes moyennes)	< 0,01 dB	1/f <sup>2</sup>
Dispersion	0-4 ns/MHz	1/f <sup>3</sup>
Scintillation	Voir le § 7.4	Voir le § 7.4

Les techniques des télécommunications et celles de l'informatique progressant rapidement, il n'est plus pertinent d'appliquer la méthode classique consistant à considérer individuellement les différents phénomènes physiques dans la dégradation de la propagation, par exemple la rotation de Faraday, le temps de propagation de groupe et les scintillations. La propagation des ondes dans l'ionosphère est un phénomène complexe, qui se manifeste différemment selon les types de systèmes. Par exemple, le niveau d'évanouissement est d'importance primordiale lorsqu'il s'agit de déterminer la disponibilité des liaisons dans un système de communication à faible marge de protection; le temps de propagation excédentaire est d'importance primordiale pour déterminer les distances de propagation et les emplacements dans un système de navigation; la dépolarisation est un phénomène important pour un système de télédétection qui utilise des signaux de double polarisation pour repérer la cible; la propriété de mobilité est d'importance primordiale pour un système de poursuite/surveillance qui est appelé à déterminer un temps d'arrêt lorsqu'il effectue un balayage dans l'espace; enfin, la diffusion avec volume commun est d'importance primordiale pour un système de brouillage intentionnel/antibrouillage qui doit pouvoir réguler le rapport brouillage intentionnel/brouillage non désiré. On voit par conséquent que le seul moyen pour traiter de façon adéquate le problème de la propagation est de faire appel comme il convient aux techniques à utiliser en matière de communication et d'informatique.

## RÉFÉRENCES POUR LE CHAPITRE 7

- AARONS, J. [1982] - Global Morphology of ionospheric scintillations, *Proc. IEEE*, Vol. 70, 360-378.
- AARONS, J. [1993] - The longitudinal morphology of equatorial F-layer irregularities relevant to their occurrence, *Space Science Reviews*, Vol. 63, 209-243.
- BAILEY, D.K. [1964] - Polar cap absorption. *Planet and Space Sci.*, Vol. 12, p. 495-541.
- BASU, S. , MACKENZIE, E. et BASU, S. [1988] - Ionospheric constraints on VHF/UHF communications links during solar maximum and minimum periods, *Radio Sci.*, Vol. 23, 363-378.
- BENT, R.B. et autres [1981] - The development of a highly-successful worldwide empirical ionospheric model and its use in certain aspects of space communications and worldwide total content investigation, *Effects of the Ionosphere on Space Systems and Communications*, ed. by T.M. Goodman, Naval Research Lab., Washington, D.C. 20375, United States Government Printing Office Stock No. 008-051-00064-0.
- BRIGGS, B.H. et PARKIN, I.A. [1963] - On the variation of radio star and satellite scintillations with zenith angle. *J. Atmos Terr Phys.*, Vol. 25, 334 - 365.
- DAVIES, K. [1980] - Recent progress in satellite radio beacon studies with particular emphasis on the ATS-6 radio beacon experiment, *Space Science Review*, 25, 357-430.
- DAVIES, K. [1990] - *Ionospheric Radio*. IEE Electromagnetic Waves Series 31, Peter Peregrinus Ltd.
- FANG, D.J. et LIU, C.H. [1987] - Propagation, Chapter 29, in *Antenna Handbook*, Y.T. Lo and S.W. Lee, editors, Van Nostrand Reinhold, New York.
- FANG, D.J. et PONTES, M.S. [1981] - 4/6 GHz ionospheric scintillation measurements during the peak of sunspot cycle 21. *COMSAT Tech. Rev.*, Vol. 11, 2, 293-320.
- GOODMAN, J.M. et AARONS, J. [1990] - Ionospheric effects on a modern electronic system, *Proc. IEEE*, Vol. 78, 512-528.
- HARGREAVES, J.K. et COWLEY, F.C. [1967] - Studies of auroral space absorption at three magnetic latitudes. *Planet and Space Sci.*, Vol 15, 1571-1585.
- HOPPE, U.-P., OFSTAD, A.E. et VAN EYKEN, A.P. [1991] - Scintillations in trans-ionospheric radio signals: studying their cause with EISCAT and the NAVSTAR GPS satellites, *1991 Nordic Society for Space Research Conference Proceedings*, Danish Meteorological Institute Scientific Report 93-1, 123.
- MAWIRA, A. [1990] Slant path 30 to 12.5 GHz copolar phase difference, first results from measurements using the OLYMPUS satellite, *Electronics Letters*, Vol. 26, 15, 1138-1139.
- MILLMAN, G.H. et OLSEN, K.A. [1980] - Ionospheric dispersion effects on wideband transmissions, *AGARD Conf Proc No 284*, Propagation Effects in Space/Earth Paths, 26-1 à 26-12.
- SECAN, J.A., BUSSEY, R.M., FREMOUW, E.J. et BASU, S. [1996] High-latitude upgrade to the WBMOD ionospheric scintillation model, *Proc. Ionospheric Effects Symposium*, 7-9 mai.

SOICHER, H. et GORMAN, F.J. [1985]- Seasonal and day-to-day variability of total electron content at mid-latitudes near solar maximum, *Radio Science*, vol 20, 383-387.

YEH, K.C. et LIU, C.H. [1982] - "Radiowave scintillations in the ionosphere", *Proc. IEEE*, Vol. 70, 324-360.

## CHAPITRE 8

### RÉFLEXIONS AU SOL ET INFLUENCE DU MILIEU LOCAL (INTERESSE SPECIALEMENT LES SYSTÈMES MOBILES À SATELLITES)

#### 8.1 Introduction

Les réflexions au sol et l'influence du milieu local sont des paramètres importants pour les stations terriennes utilisant des antennes à large ouverture de faisceau, par exemple les stations de communication généralement utilisées dans le service mobile par satellite. Ces phénomènes entraînent habituellement une dégradation de la qualité de fonctionnement d'une liaison de communication, même si on observe de temps à autre des renforcements des signaux.

Les réflexions au sol se produisent à proximité immédiate de la station ou sont causées par des réflecteurs plus lointains, par exemple des montagnes ou de grosses structures construites par l'homme. Les signaux réfléchis peuvent brouiller et dégrader de façon inacceptable le signal direct émis par le satellite. En dehors des évanouissements, les signaux subissent d'autres dégradations, notamment les brouillages entre symboles imputables aux phénomènes d'écho.

L'influence du milieu local recouvre les effets d'écran et le blocage causés par des objets et par la végétation à proximité de la station terrienne. D'autres sources de bruit situées dans le milieu local ont une influence sur les liaisons de communication, notamment les sources de bruit large bande (équipements électriques et véhicules automobiles) et les émissions hors bande d'émetteurs puissants (radars).

La dégradation est plus ou moins grande selon l'application. Par exemple, dans le cas de liaisons types du service mobile terrestre par satellite (SMTS), des mesures [Butterworth, 1984] et une analyse théorique (voir le problème pris à titre d'exemple au § 8.2.6) indiquent que la composante réflexion spéculaire est en général négligeable pour des angles d'élévation du trajet de plus de 20°. Pour des terminaux portables toutefois, les réflexions spéculaires peuvent être importantes car la faible directivité de l'antenne accroît les risques de réflexions spéculaires importantes.

Pour la conception des liaisons de systèmes du service mobile par satellite (SMS) les évanouissements par trajets multiples auxquels s'ajoute éventuellement un effet d'écran et de blocage du signal direct émis par le satellite constituent la principale cause de dégradation. Il ne faut pas oublier toutefois qu'à des fréquences inférieures à quelques gigahertz, les effets de la propagation ionosphérique (Chapitre 7) peuvent être très importants et que pour des fréquences supérieures à quelques gigahertz les effets troposphériques (Chapitres 3-6) ne sont pas nécessairement négligeables.

#### 8.2 Influence de la surface terrestre

Il est difficile de prévoir les dégradations de propagation imputables à des réflexions à la surface de la Terre ou à des objets (bâtiments, végétation) situés à la surface car les scénarios de dégradation possibles sont nombreux, complexes et souvent difficiles à quantifier (par exemple, il est souvent difficile d'indiquer précisément l'importance du phénomène d'effet d'écran sur les liaisons du service mobile terrestre par satellite). Les modèles de prévision des dégradations pour des scénarios

complexes (en particulier pour les liaisons du SMTS) ont donc tendance à être essentiellement empiriques, les possibilités d'application de modèles plus analytiques, comme ceux utilisés pour prévoir les évanouissements par réflexion sur la surface de la mer (§ 8.2.2) étant limitées. Cela étant, les principales caractéristiques des réflexions à la surface et des conséquences sur la propagation des signaux relèvent de la théorie générale des réflexions à la surface résumée ci-après.

## 8.2.1 Réflexion à la surface de la Terre

### 8.2.1.1 Réflexion spéculaire sur une surface terrestre plane

Le coefficient de réflexion  $R_0$  d'une surface plane est donné par la formule:

$$R_0 = \frac{\sin\varphi - \sqrt{C}}{\sin\varphi + \sqrt{C}} \quad (8.1)$$

dans laquelle  $\varphi$  est l'angle rasant et

$$C = \eta - \cos^2 \varphi \quad \text{pour la polarisation horizontale,}$$

$$C = (\eta - \cos^2 \varphi) / \eta^2 \quad \text{pour la polarisation verticale,}$$

avec

$$\eta = \varepsilon_r(f) - j60\lambda\sigma(f)$$

où:

$\varepsilon_r(f)$ : permittivité relative du sol à la fréquence  $f$

$\sigma(f)$ : conductivité du sol à la fréquence  $f$  (S/m) et

$\lambda$ : longueur d'onde en espace libre (m).

Le coefficient  $R_0$  est représenté à la Figure 8.1 en fonction de l'angle d'inclinaison pour diverses fréquences et deux séries de valeurs pour  $\varepsilon_r(f)$  et  $\sigma(f)$  correspondant à l'eau de mer et au terrain sec respectivement [Hall, 1979] (voir également la Recommandation UIT-R P.527 concernant les caractéristiques diélectriques des différents types de surface terrestre). L'angle pour lequel le module du coefficient de réflexion pour la polarisation verticale a une valeur minimale est appelé angle de Brewster. Cet angle,  $\varphi_p$ , est approximativement égal à  $\sin^{-1}(1/\sqrt{|\eta|})$ .

Le coefficient de réflexion spéculaire pour la polarisation verticale est inférieur ou égal au coefficient de réflexion spéculaire pour la polarisation horizontale. De ce fait, la polarisation de l'onde réfléchie sera différente de la polarisation de l'onde incidente si la polarisation incidente n'est pas purement horizontale ou purement verticale. Par exemple, une onde incidente polarisée circulairement devient polarisée elliptiquement après réflexion. Le sens de la rotation lui aussi s'inverse si l'angle d'inclinaison est supérieur à l'angle de Brewster.

On effectue habituellement le calcul de l'amplitude et de la polarisation de l'onde réfléchie en décomposant l'onde incidente en composantes horizontale et verticale, puis en calculant l'amplitude et la phase de chacune des composantes de l'onde réfléchie en utilisant l'équation (8.1).

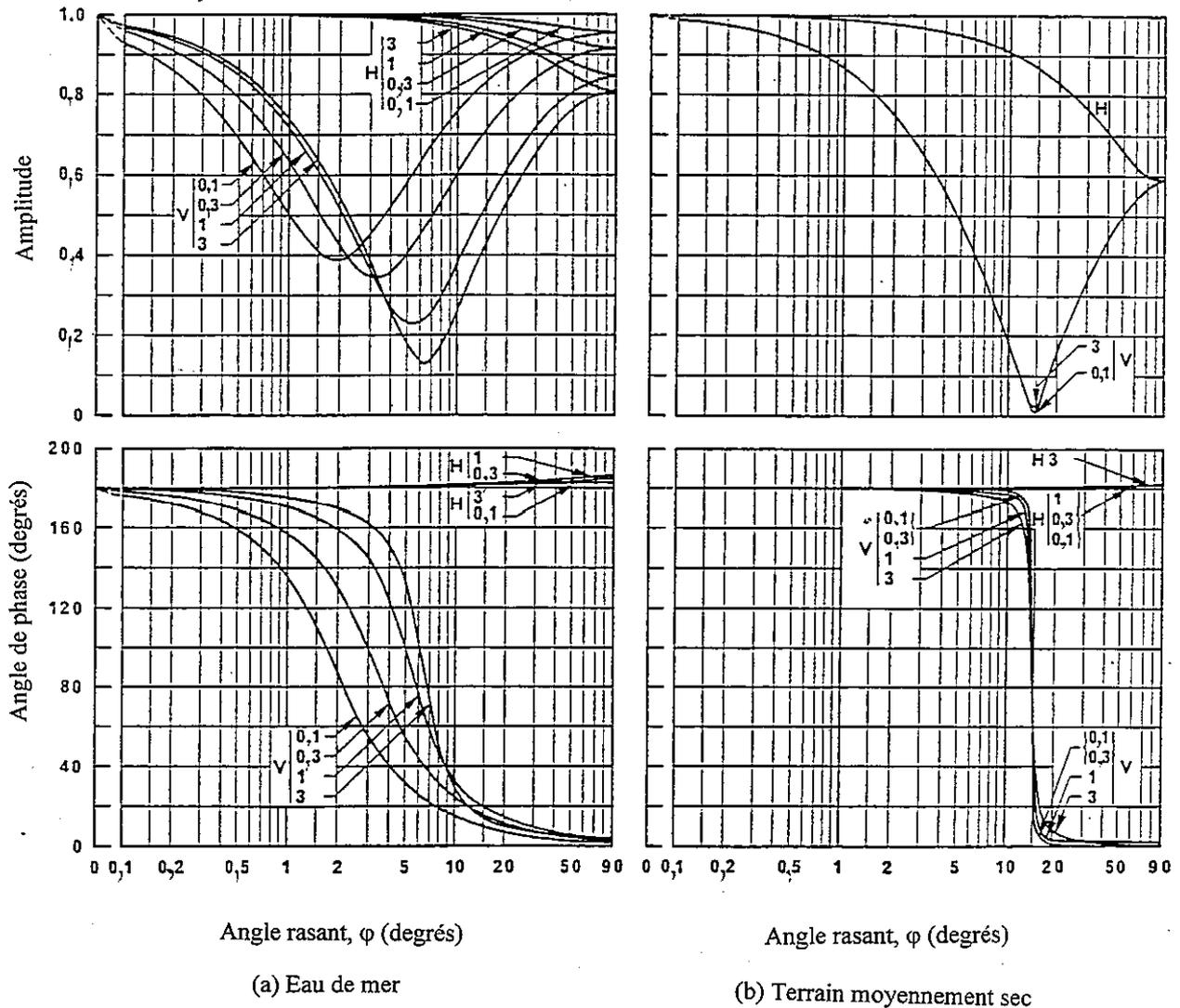


FIGURE 8.1

**Amplitude et phase du coefficient de réflexion d'une surface terrestre plane en fonction de l'angle rasant,  $\phi$ , en polarisation verticale V et horizontale H**

Les fréquences sont indiquées en GHz.

NOTE - Les caractéristiques de l'eau de mer et du terrain moyennement sec sont données dans la Recommandation UIT-R P.527.

### 8.2.1.2 Réflexion spéculaire sur une Terre sphérique lisse

la réflexion d'un signal sur une Terre sphérique lisse (voir la Figure 8.2) est qualifiée de spéculaire car l'angle rasant,  $\phi$ , est égal à l'angle de réflexion. L'amplitude du signal réfléchi est égale à celle du signal incident multipliée par le module du coefficient de réflexion  $R$ . La phase du signal réfléchi est égale à la somme de la variation de phase due à la réflexion et de celle due à la différence de longueur entre les trajets du signal direct et du signal réfléchi.

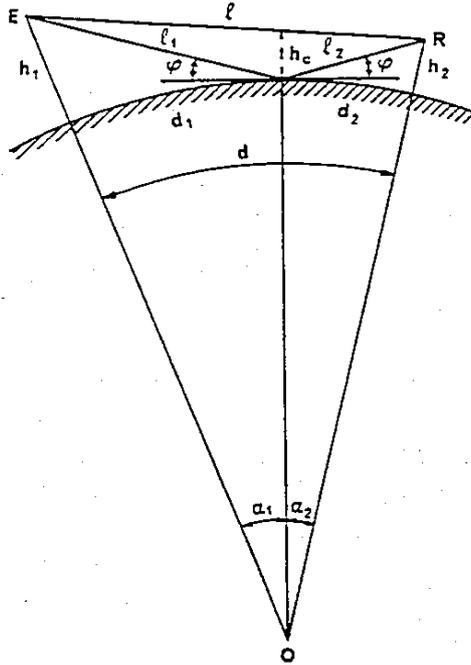


FIGURE 8.2

### Géométrie de la réflexion sur une Terre sphérique

Pour analyser les réflexions sur une surface, il faut déterminer le point géométrique de réflexion spéculaire, qui est situé à une certaine distance  $d_1$  de l'un des terminaux. Ce n'est pas là un problème facile car on ne peut trouver de solution exacte que dans le cas d'une Terre plane. On peut trouver des solutions approchées pour de faibles distances angulaires lorsque les terminaux sont proches de la surface de la Terre et quand ils sont séparés par de très grandes distances, comme c'est le cas pour un terminal de Terre et un satellite géostationnaire [Boithias, 1987].

Pour les trajets Terre-espace,  $l$  et  $l_1$  sont pratiquement parallèles en raison des grandes distances considérées. Dans ce cas:

$$d_1 \approx h \cotg \theta \quad (8.2)$$

$$\Delta \approx 2h \sin \theta \quad (8.3)$$

$$\varphi \approx \theta + \frac{h}{a_e + h} \cotg \theta \text{ radians} \quad (8.4)$$

$\theta$  étant l'angle d'élévation du satellite,  $h$  la hauteur de la station terrienne au-dessus de la surface terrestre et  $a_e$  le rayon effectif de la Terre.

#### 8.2.1.3 Facteur de divergence

Lorsqu'il y a réflexion spéculaire des rayons sur une surface sphérique, le coefficient de réflexion subit une réduction apparente, qui est en réalité un effet géométrique tenant à la divergence des rayons. On tient compte de cet effet en exprimant le coefficient de réflexion d'une Terre sphérique lisse par la formule:

$$R = D R_0 \quad (8.5)$$

où  $R_0$  est le coefficient de réflexion de la formule (8.1) pour le cas de la surface plane et  $D$  un facteur de divergence.

Le facteur de divergence pour les trajets Terre-espace peut s'écrire:

$$D = \left[ 1 + \frac{2h \operatorname{tg} E}{a_e \sin \varphi} \right]^{-1/2} \quad (8.6)$$

La formule (8.6) donne  $D \approx 1$  pour des angles d'élévation supérieurs à  $5^\circ$  environ et des hauteurs du terminal inférieures à 2 km.

Dans le cas d'une Terre sphérique lisse, on peut assimiler le mécanisme de réflexion à la réflexion d'un rayon incident unique par un point géométrique unique. Toutefois, la surface de toute la zone contribue à la réflexion du signal et les régions qui y contribuent le plus sont les zones de Fresnel proches du point de réflexion géométrique.

Le coefficient de réflexion équivalent d'une Terre sphérique, compte tenu des effets de divergence et de réflexion partielle, est donné par l'expression:

$$R = FDR_0 \quad (8.7)$$

où  $F$  est le coefficient de réflexion partielle. En théorie, la valeur de  $F$  peut être comprise entre 0 et 2; dans la pratique, elle est comprise entre 0,1 et 1,2 dans la majorité des cas.

#### 8.2.1.4 Réflexion sur une surface rugueuse

Il arrive souvent dans la pratique que la surface de la Terre ne soit pas lisse. La réflexion des ondes radioélectriques sur des surfaces rugueuses a fait l'objet d'études approfondies [Beckman et Spizzichino, 1963], mais la question est si complexe que l'on n'est pas arrivé à élaborer des formules qui dérivent le processus de réflexion dans sa totalité.

Une formule utile est la suivante, qui définit quantitativement le critère de rugosité de Rayleigh:

$$g = 4\pi(S_h / \lambda)\sin\varphi \quad (8.8)$$

où:

$S_h$ : écart type de la hauteur de la surface autour de sa moyenne locale à l'intérieur de la première zone de Fresnel;

$\lambda$ : longueur d'onde en espace libre;

$\varphi$ : angle rasant mesuré par rapport à une tangente à la surface.

De façon générale, on peut considérer qu'une surface est lisse lorsque  $g < 0,3$ . Quand la surface est rugueuse, le signal réfléchi a deux composantes: l'une, spéculaire, qui est cohérente avec le signal incident, l'autre, diffuse, qui varie en amplitude et en phase selon une distribution de Rayleigh.

#### 8.2.1.4.1 Coefficient de réflexion spéculaire sur une surface irrégulière

La composante spéculaire provient d'une réflexion cohérente dans le plan d'incidence, à partir des zones de Fresnel situées autour du point de réflexion géométrique. On peut la décrire au moyen d'un coefficient de réflexion  $R_s = \rho_s R$ ,  $\rho_s$  étant un facteur de réduction qui dépend du modèle. Pour une surface peu irrégulière, avec une distribution aléatoire des hauteurs:

$$\rho_s = \exp(-g^2 / 2) \quad (8.9)$$

Pour une surface très irrégulière, la valeur de  $\rho_s$  fournie par l'équation (8.9) tend à être sous-estimée. Il existe des modèles théoriques [DeSanto, 1981] faisant intervenir des réflexions multiples et qui concordent bien avec les données expérimentales, mais qui ne permettent de calculer  $\rho_s$  qu'au moyen de méthodes d'intégration numérique.

Une détermination ultérieure de  $\rho_s$  pour les surfaces de la mer [Miller et autres, 1984] conduit à penser qu'une meilleure estimation pour cette grandeur est donnée par l'expression:

$$\rho_s = \exp(-g^2 / 2) I_0(g^2 / 2) \quad (8.10)$$

dans laquelle  $I_0$  est la fonction de Bessel modifiée d'ordre zéro. Cette expression donne de bons résultats en accord avec les valeurs mesurées des coefficients de réflexion sur la surface de la mer.

#### 8.2.1.4.2 Amplitude du coefficient de réflexion diffuse

La composante diffuse du signal réfléchi provient de la diffusion sur une grande surface, et ce sont des régions situées bien au-delà de la première zone de Fresnel qui y contribuent le plus. La région dont il s'agit est connue sous le nom de "surface de scintillation". Cette surface diffuse les signaux sans qu'il y ait aucune direction privilégiée. On peut définir un coefficient de réflexion diffuse:

$$R_d = \rho_d |R| \quad (8.11)$$

$\rho_d$  étant un coefficient qui dépend uniquement des irrégularités de la surface.

On ne trouve nulle part d'expression simple pour  $\rho_d$ . Ce facteur est nul pour une Terre lisse. Il est maximal pour une surface très rugueuse et sa limite supérieure dépend de la directivité de l'antenne et de la nature de la surface. Pour une antenne peu directive au-dessus d'un sol nu ou de la mer  $\rho_d$  est compris entre 0,2 (-14 dB) et 0,4 (-8 dB), sa valeur la plus probable étant de 0,35 pour une surface très rugueuse. Lorsque la surface de scintillation n'est pas illuminée dans sa totalité du fait que les antennes sont très directives ou que la présence d'un écran ou de végétation introduit une absorption superficielle notable, le facteur  $\rho_d$  est inférieur à 0,2 et peut être négligeable.

Des mesures expérimentales et une analyse théorique indiquent que la composante diffuse est statistiquement aléatoire et suit une distribution de Rayleigh.

#### 8.2.1.4.3 Champ réfléchi total

La Figure 8.3 représente les coefficients de réflexion spéculaire et de réflexion diffuse mesurés à la surface de la mer [Beard, 1961]. L'équation (8.9) y est également représentée. Le champ total au-dessus d'une surface réfléchissante est la résultante du champ direct, de la composante spéculaire cohérente et de la composante diffuse aléatoire. Le champ résultant obéit à une distribution de Nakagami-Rice. Si l'on admet que la puissance totale diffusée vers l'avant est constante, la relation:

$$\langle \rho_s \rangle^2 + \langle \rho_d \rangle^2 = \text{constante} \quad (8.12)$$

dans laquelle  $\langle \rho \rangle$  indique une valeur quadratique moyenne, peut être utile pour l'estimation du champ réfléchi. Lorsque l'on calcule le champ résultant, on doit également tenir compte de la directivité de l'antenne.

La réflexion sur des surfaces irrégulières fait l'objet d'un certain nombre d'études théoriques. Malheureusement, il n'existe actuellement pas de formules techniques satisfaisantes qui conviennent pour évaluer les évanouissements dus aux trajets multiples résultant de ce type de réflexion. D'importants progrès ont cependant été obtenus concernant les surfaces de la mer pour des fréquences proches de 1,5 GHz [Karasawa et Shiokawa, 1984a]. Le principe de la méthode utilisée pour cette fréquence est probablement valable pour des fréquences moins élevées et pourrait servir de base à l'étude du cas des fréquences plus élevées.

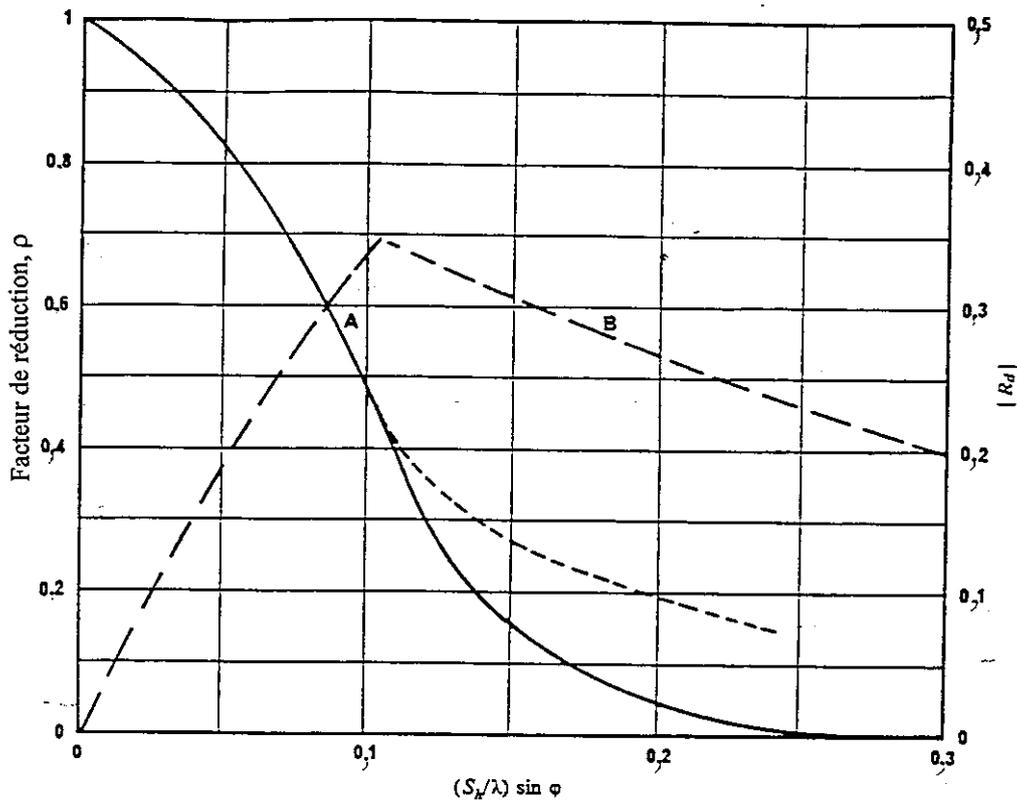


FIGURE 8.3

### Réflexions par des surfaces irrégulières

La courbe A correspond à la composante spéculaire. La ligne en trait plein est calculée d'après l'équation (8.9). La ligne en tirets représente les données expérimentales.

La courbe B est un coefficient de réflexion diffuse,  $R_d$ .

### **8.2.1.5 Propagation par trajets multiples après réflexion**

Compte tenu de l'existence des phénomènes de réflexion à la surface décrits ci-dessus, il se peut que les signaux arrivant au récepteur proviennent de plusieurs sources apparentes. La combinaison de la composante directe (visibilité directe) et des composantes de réflexion spéculaire et de réflexion diffuse est à l'origine d'un évanouissement du signal au niveau du récepteur. L'évanouissement par trajets multiples qui en résulte, auquel s'ajoute parfois un effet d'écran et de blocage plus ou moins important de la composante en visibilité directe, peut être à l'origine d'un évanouissement important et rapide de la puissance du signal reçu pour des stations mobiles, et constitue donc en général la principale cause de dégradation pour les systèmes du service mobile par satellite.

On trouvera au § 5 de la Recommandation UIT-R P.681 des modèles de propagation par trajets multiples pour les liaisons du SMMS et des modèles de propagation par trajets multiples après réflexion sur la surface de la mer pour les liaisons du SMMS et SMAS respectivement au § 4 de la Recommandation UIT-R P.680 et au § 4 de Recommandation UIT-R P.682. Les évanouissements dus aux phénomènes de propagation par trajets multiples sont examinés aux § 8.2.2 et 8.2.4 du présent manuel.

## **8.2.2 Évanouissements dus aux réflexions sur la surface de la mer**

### **8.2.2.1 Généralités**

L'évanouissement par trajets multiples dû à la réflexion sur la surface de la mer est causé par l'interférence entre les ondes directes et les ondes réfléchies. Les ondes réfléchies comportent une composante cohérente (réflexion spéculaire) et une composante incohérente (réflexion diffuse) qui fluctue avec le mouvement des vagues de la mer. La composante cohérente prédomine lorsque la mer est calme et à des angles d'élévation faibles, alors que la composante incohérente devient significative lorsque la mer est forte. Si l'on connaît à la fois l'intensité de la composante cohérente et la variance de la composante incohérente, on pourra déterminer la distribution temporelle cumulative de l'intensité du signal selon des considérations statistiques [Beckmann et Spizzichino, 1963; Karasawa et Shiokawa, 1984a].

Le premier modèle pour la prévision de l'évanouissement par trajets multiples dû à la réflexion sur la surface de la mer a été élaboré pour les besoins des systèmes du service mobile maritime par satellite (SMMS) fonctionnant aux environs de 1,5 GHz. La réflexion sur la surface de la mer obéit au même mécanisme pour le SMMS et pour les systèmes du service mobile aéronautique par satellite (SMAS); néanmoins, on pense que les caractéristiques des évanouissements sont différentes dans ces deux types de systèmes, la vitesse et l'altitude des aéronefs étant très supérieures à celles des navires.

On trouvera ci-après des informations de base sur les modèles servant aux prévisions des évanouissements par réflexion sur la surface de la mer, tels que spécifiés dans la Recommandation UIT-R P.680 (pour le SMMS) et dans la Recommandation UIT-R P.682 (pour le SMAS).

### **8.2.2.2 Caractéristiques de la surface de la mer**

Le paramètre le plus communément utilisé pour définir l'état de la mer est la hauteur significative des vagues,  $H$ , définie comme valeur moyenne des hauteurs crête/creux pour le tiers le plus haut de toutes les vagues. Empiriquement, le rapport entre  $H$  et la valeur quadratique moyenne de la hauteur,  $h_0$ , est donné par [Kinsman, 1965]:

$$H = 4h_0 \quad (8.13)$$

Le Tableau 8.1 contient des données statistiques relatives à l'occurrence de hauteurs significatives de vagues dans diverses régions du monde [Long, 1975]. Selon des mesures faites avec le satellite "GEOS-III", la valeur moyenne de la hauteur significative des vagues dans plusieurs régions du monde variait entre 2 et 4 mètres, selon la saison et la latitude [Sandowell et Agreen, 1984].

**TABLEAU 8.1**  
**Fréquence relative (en %) des hauteurs significatives des vagues dans**  
**diverses régions du monde [Long, 1975]**

Région	Hauteur des vagues (m)					
	0-0,9	0,9-1,2	1,2-2,1	2,1-3,6	3,6-6	>6
Atlantique Nord, entre Terre-Neuve et l'Angleterre	20	20	20	15	10	15
Atlantique, latitudes équatoriales	20	30	25	15	5	5
Atlantique Sud, latitudes du sud de l'Argentine	10	20	20	20	15	10
Pacifique Nord, latitudes de l'Oregon et du sud de la péninsule de l'Alaska	25	20	20	15	10	10
Pacifique Est, latitudes équatoriales	25	35	25	10	5	5
Ceinture des vents d'ouest du Pacifique Sud, latitudes du sud du Chili	5	20	20	20	15	15
Nord de l'océan Indien, nord-est de la zone des moussons (saison de la mousson)	55	25	10	5	0	0
Nord de l'océan Indien, sud-ouest de la zone des moussons (saison de la mousson)	15	15	25	20	15	10
Sud de l'océan Indien, entre Madagascar et le nord de l'Australie	35	25	20	15	5	5
Ceinture des vents d'ouest du sud de l'océan Indien, sur le trajet entre le Cap de Bonne-Espérance et le sud de l'Australie	10	20	20	20	15	15
Moyenne pour toutes les régions	22	23	20,5	15,5	9,5	9,0

Pour calculer la composante incohérente des évanouissements dus à des trajets multiples, il faut un modèle de la distribution des pentes  $\beta_0$  des facettes de la surface de la mer. D'une manière générale, la distribution des pentes doit être pondérée en fonction de la fréquence radioélectrique, étant donné que les pentes ne contribuent pas toutes à la diffusion à une fréquence donnée. La surface de la mer peut être considérée comme une surface composite irrégulière, composée de grandes vagues à peu près périodiques auxquelles se superposent des vagues plus petites.

À 1,5 GHz, on peut ne pas tenir compte des vagues plus petites et la valeur quadratique moyenne des pentes à la surface semble tomber entre 0,04 et 0,07 pour les hauteurs de vagues inférieures à 4 m [Karasawa et Shiokawa, 1984a]. La Figure 8.4 montre la relation qui existe entre la valeur quadratique moyenne des pentes et la hauteur des vagues. On a observé ailleurs des valeurs quadratiques moyennes de pente atteignant 0,2 [Département des transports des États-Unis d'Amérique, 1973].

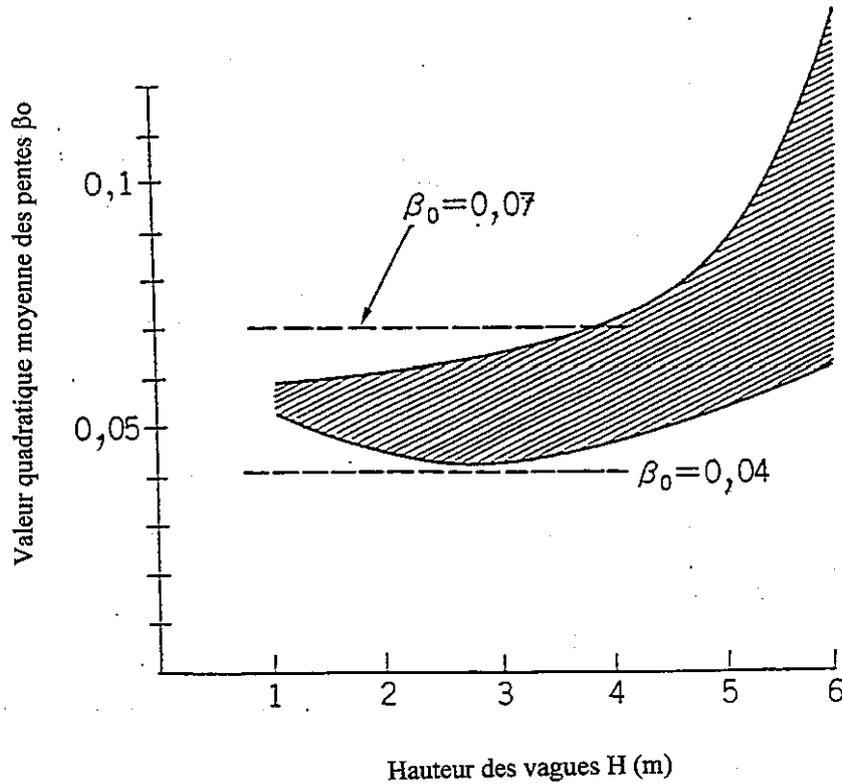


FIGURE 8.4

**Relation entre la hauteur des vagues,  $H$ , et la valeur quadratique moyenne des pentes,  $\beta_0$ , [Karasawa et Shiokawa, 1984a]**

### 8.2.2.3 Modèle de calcul des évanouissements

#### 8.2.2.3.1 Théorie de base

L'amplitude de la composante à réflexion cohérente,  $E_r^C$ , par rapport au signal direct, a pour expression:

$$E_r^C = |R|g_r \exp\left(\frac{-u^2}{2}\right) I_0\left(\frac{u^2}{2}\right) \quad (8.14)$$

avec

$$u = \frac{(4\pi h_0 \sin\theta_i)}{\lambda} \quad (8.15)$$

où

$R$ : coefficient de réflexion spéculaire de la mer;

$g_r$ : gain d'antenne en direction du point de réflexion spéculaire par rapport à la ligne de visée;

$I_0$ : fonction de Bessel modifiée, de première espèce et d'ordre zéro;

$\lambda$ : longueur d'onde du signal radioélectrique;

$\theta_i$ : angle d'élévation.

La profondeur maximale des évanouissements,  $A_{max}^C$ , est atteinte lorsque le signal par trajets multiples cohérent se trouve en opposition de phase par rapport au signal direct; elle est donnée par la formule:

$$A_{max}^C = -20 \log(1 - E_r^C) \quad \text{dB} \quad (8.16)$$

Cette valeur diminue rapidement à mesure que la hauteur des vagues, l'angle d'élévation et la fréquence augmentent. En pratique, la valeur maximale des évanouissements est rarement atteinte car l'antenne du navire se déplace par rapport à la hauteur moyenne de la surface de la mer.

La composante incohérente est aléatoire, tant en amplitude qu'en phase, en raison de la réflexion sur un grand nombre de facettes brillantes présentes sur les vagues. L'amplitude de cette composante suit une distribution de Rayleigh et sa phase une distribution uniforme. La variance de l'amplitude est donnée par:

$$V(E_r^I) = \frac{1}{4\pi} \iint_{\text{surface de la mer}} |R|^2 g_r^2 \sigma \cotg \theta_i d\theta_s d\phi_s \quad (8.17)$$

où

$\sigma$ : section transversale de diffusion moyenne par unité de surface d'une surface irrégulière parfaitement conductrice, exempte de diffusion par trajets multiples; elle dépend des irrégularités de la surface de la mer ( $h_0$  et  $\beta_0$ , voir le § 8.2.2.2) et de la polarisation à l'émission et à la réception;

$\theta_s, \phi_s$ : angles de diffusion (voir la Figure 8.5).

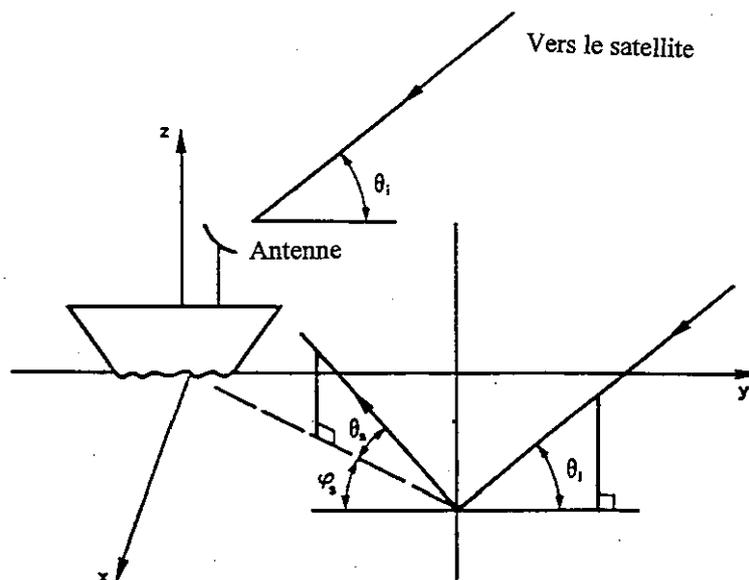


FIGURE 8.5

Géométrie de la diffusion à la surface de la mer

L'amplitude du signal obtenu au terminal du navire (somme de la composante onde directe, des composantes cohérente et incohérente de la réflexion) a une distribution du type Nakagami-Rice (voir la Recommandation UIT-R P.1057). La distribution cumulative des évanouissements dépend du rapport d'intensité signal cohérent/signal incohérent. Par exemple, en cas de mer forte, à 1,5 GHz, la réflexion cohérente sur la surface de la mer est pratiquement inexistante et le signal cohérent ne comprend que la composante directe [Karasawa et Shiokawa, 1984a; Dissanayake et autres, 1985]. Pour cette raison, les évanouissements sont déterminés par le rapport "porteuse/trajets multiples" ( $C/M$ ), c'est-à-dire le rapport des puissances du signal direct et de la composante liée aux trajets multiples, due à des réflexions incohérentes.

En faisant la somme de  $A_{max}^C$ , et de  $A^I(p)$  (évanouissement du signal dû à la composante incohérente en fonction du pourcentage de temps,  $p$ ), on obtient une évaluation pratique des effets combinés de l'évanouissement des signaux cohérents et incohérents par trajets multiples en fonction de l'état de la mer:

$$A^T(p) = A_{max}^C + A^I(p) \quad (8.18)$$

La valeur maximale de l'évanouissement dû à la composante cohérente n'est pas présente en permanence, en raison du mouvement vertical de l'antenne du navire par rapport au niveau moyen de la surface de la mer; l'estimation donnée par l'équation (8.18) semble donc être la valeur correspondant au cas le plus défavorable. Dans la pratique, pour les petits angles d'élévation (inférieurs à  $10^\circ$ ), dans la gamme des fréquences de la bande L, la profondeur des évanouissements est la plus grande lorsque la hauteur significative des vagues oscille entre 1,5 et 3 m (la composante cohérente de l'onde réfléchie sur la surface de la mer est négligeable dans cet intervalle). L'influence de la hauteur des vagues sur la profondeur d'évanouissement est relativement faible dans cet intervalle [Karasawa et Shiokawa, 1984a; Ohmori et autres, 1985; Karasawa et autres, 1990a]. (Voir également le § 8.3.3 qui décrit le mouvement de l'antenne pour le SMMS.)

La Figure 8.6 donne les valeurs de la profondeur d'évanouissement non dépassée pendant 99% du temps et les valeurs correspondantes du rapport "porteuse/trajets multiples",  $C/M$ , en polarisation circulaire, à 1,5 GHz, pour une hauteur significative des vagues comprise entre 1,5 et 3m.

Étant donné que le modèle théorique ne permet pas d'effectuer des calculs techniques au moyen d'une petite calculatrice, il est commode de disposer de modèles de prévision plus simples pour déterminer de manière approximative les évanouissements ou le brouillage. De telles méthodes simples, qui permettent de prévoir la puissance liée à la propagation par trajets multiples ou la profondeur d'évanouissement, ont été mises au point par Sandrin et Fang [1986] et par Karasawa et Shiokawa [1988] pour le SMMS, et par Karasawa et autres [1990b] pour le SMAS. Les renseignements détaillés sur ce sujet figurent au paragraphe suivant.

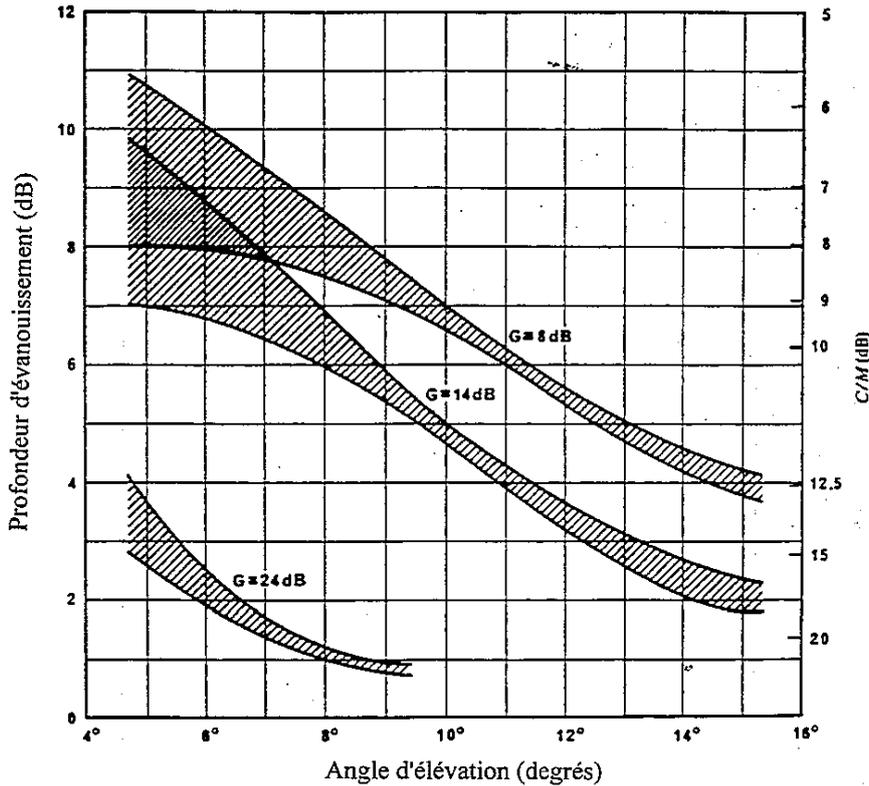


FIGURE 8.6

**Profondeur d'évanouissement non dépassée pendant 99% du temps et rapport porteuse/trajets multiples, C/M**

En polarisation circulaire à 1,5 GHz, pour une hauteur significative des vagues comprise entre 1,5 et 3 m (la composante cohérente de l'onde réfléchie est négligeable dans cet intervalle)

**8.2.2.3.2 Méthode de prévision simple de la profondeur des évanouissements pour le service mobile maritime par satellite et le service mobile aéronautique par satellite**

Des analyses théoriques et des résultats expérimentaux [Karasawa et Shiokawa, 1984a, 1988; Karasawa et autres, 1990b], ont montré que, pour la plupart des cas avec de petits angles d'élévation sur les trajets Terre-espace à 1,5 GHz, la loi suivante de la conservation de l'énergie est satisfaite en première approximation:

$$\begin{aligned}
 &[\text{puissance de la composante cohérente}] + \\
 &[\text{puissance moyenne de la composante incohérente}] \cong \text{constante} \qquad (8.19)
 \end{aligned}$$

Si cette relation est satisfaite, il est facile d'estimer la puissance incohérente maximale, en calculant la puissance cohérente pour  $u = 0$ . Pour obtenir une estimation plus précise, il faut apporter de petites modifications aux lois de dépendance de certains paramètres. La méthode modifiée a été adoptée dans la Recommandation UIT-R P.680 pour le SMMS et dans la Recommandation UIT-R P.682 pour le SMAS. Ces Recommandations indiquent les conditions qui doivent être satisfaites pour l'application des méthodes de calcul.

La Figure 8.7 est un diagramme de dispersion des profondeurs d'évanouissement (évanouissements se produisant pendant 99% du temps par rapport aux évanouissements se produisant pendant 50% du temps) dans le cas du SMMS, entre les résultats de mesure et les valeurs d'estimation fournies par la méthode de calcul simple, pour les mêmes conditions. Dans cette Figure,  $F_{dp2}$  désigne les valeurs obtenues avec la méthode décrite dans la Recommandation UIT-R P.680, et  $F_{dp1}$  les valeurs

fournies par une autre méthode dans laquelle on pose  $\theta = 2,0 \theta_i$ , au lieu de  $\theta = 1,5 \theta_i$  dans l'Étape 1 de la méthode de prévision. On voit à l'évidence que les valeurs données par ces méthodes sont en bon accord avec les valeurs expérimentales, bien que les méthodes soient assez approximatives.

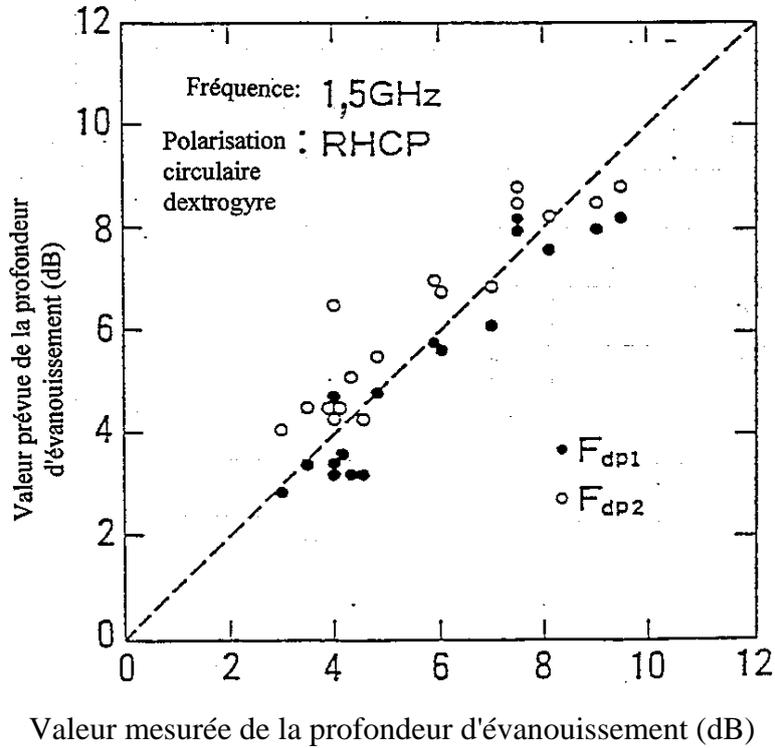


FIGURE 8.7

**Diagramme de dispersion des valeurs mesurées et prévues de la profondeur d'évanouissement dans le SMMS**

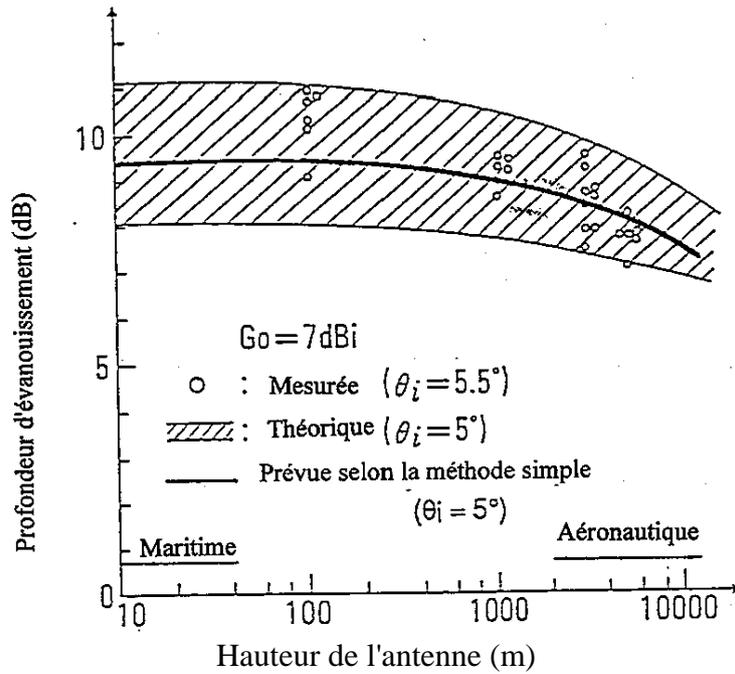


FIGURE 8.8

**Profondeur d'évanouissement non dépassée pendant 99% du temps, en fonction de la hauteur de l'antenne**

La Figure 8.8 montre comment la profondeur d'évanouissement des signaux varie en fonction de l'altitude pendant 99% du temps, à partir de mesures faites par hélicoptère [Karasawa et autres, 1990b]; on y trouvera aussi des valeurs calculées selon la méthode d'estimation simple de la Recommandation UIT-R P.682 (courbe en trait plein) et à l'aide du modèle théorique (surface hachurée) [Yasunaga et autres, 1986]. La figure montre que la méthode de prévision simple est en bon accord avec le modèle théorique et avec les données de mesure, même dans le cas du SMAS.

### 8.2.2.3.3 Spectre des évanouissements

Dans la conception des systèmes, surtout pour les systèmes à transmission numérique, il importe non seulement de faire l'estimation de la profondeur d'évanouissement mais encore de connaître les propriétés des variations temporelles, par exemple le spectre puissance/fréquence et les statistiques concernant la durée des évanouissements par trajets multiples.

Karasawa et Shiokawa [1984b] ont procédé à une analyse théorique dans le cas du SMMS. Ils ont pris en compte des paramètres qui influent sur le spectre, par exemple la hauteur des vagues, la direction des vagues, le cap et la vitesse de déplacement du navire, l'angle d'élévation du trajet et les variations de la hauteur d'antenne sous l'effet des mouvements du navire (roulis et tangage).

En général, la largeur de bande spectrale augmente avec la hauteur de la vague, l'angle d'élévation, la vitesse de déplacement du navire et le mouvement relatif de l'antenne placée à bord de celui-ci. La polarisation et le gain de l'antenne influent très peu en général sur la forme du spectre. Dans la plupart des cas, la forme spectrale calculée varie en général selon une loi en  $f^{-4}$ . La Figure 8.9 donne les spectres de puissance calculés des évanouissements par trajets multiples à 1,5 GHz dans trois cas avec grande largeur de bande spectrale, les conditions d'essai étant les suivantes: hauteur des vagues de 5 m et angle d'élévation de 10°. La largeur de bande spectrale à -10 dB est d'environ 5 Hz dans le cas de la réception à bord d'un navire qui subit des mouvements de grande amplitude.

Sur la base du modèle, la Recommandation UIT-R P.680 donne le domaine de variation probable de la largeur de bande spectrale à -10 dB pour des évanouissements par trajets multiples, à 1,5 GHz.

La vitesse de déplacement des aéronefs est très supérieure à celle des navires. En conséquence, la vitesse de fluctuation des évanouissements par trajets multiples est beaucoup plus grande dans le SMAS que dans le SMMS, en fonction de l'angle d'élévation de la trajectoire de vol,  $\theta_p$ , mesuré par rapport au plan horizontal. Les valeurs calculées de la largeur de bande spectrale à -10 dB s'échelonnent entre environ 20 Hz et 200 Hz pour les paramètres suivants: angle d'élévation compris entre 5 et 20°; angle d'élévation de la trajectoire compris entre 0 et 5°; vitesse de vol 1 000 km/h [Karasawa et autres, 1990b].

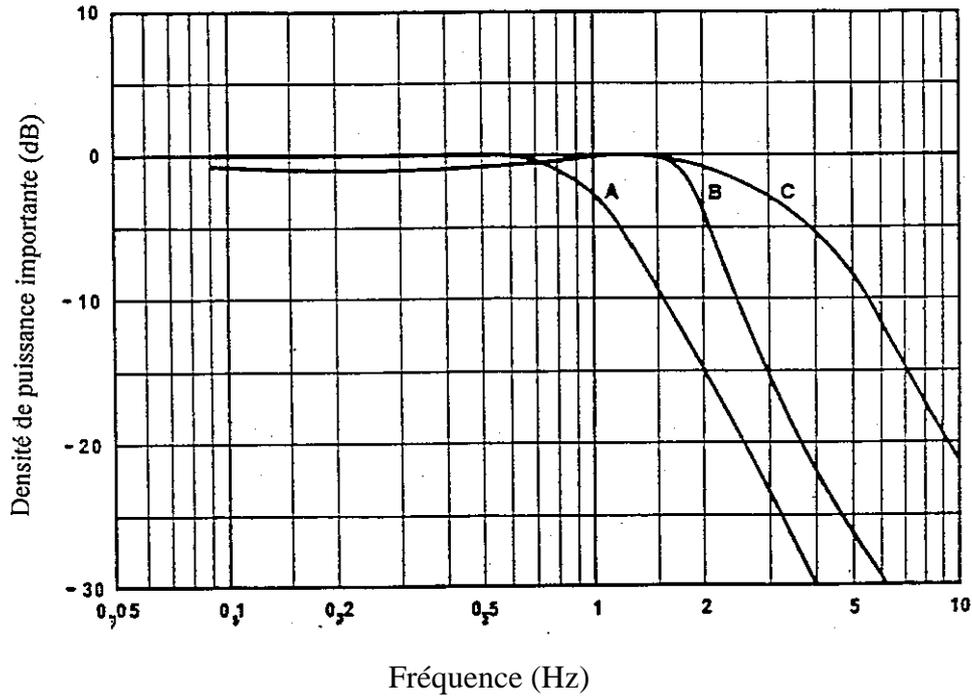


FIGURE 8.9

**Spectres de puissance des évanouissements par trajets multiples à 1,5 GHz dus à la réflexion sur la surface de la mer pour trois cas présentant une largeur de bande spectrale étendue**

(hauteur des vagues: 5 m, angle d'élévation: 10°, gain d'antenne: 13 dBi)

Cas A: réception sur une plate-forme fixe

Cas B: réception à bord d'un navire sans mouvement de roulis et/ou de tangage

Cas C: réception à bord d'un navire ayant des mouvements de roulis et/ou de tangage importants

**8.2.2.3.4 Statistiques de durée des évanouissements**

En se fondant sur des données de mesure, Karasawa et Shiokawa [1987] ont analysé des statistiques de durée des évanouissements se rapportant au SMMS. La Figure 8.10 définit la durée des évanouissements,  $T_D$  et l'intervalle entre évanouissements,  $T_I$ . Les valeurs moyennes de  $T_D$  et  $T_I$  ( $\langle T_D \rangle$  et  $\langle T_I \rangle$ ) dépendent de la vitesse de fluctuation, mais aussi du niveau du seuil en fonction du pourcentage de temps.

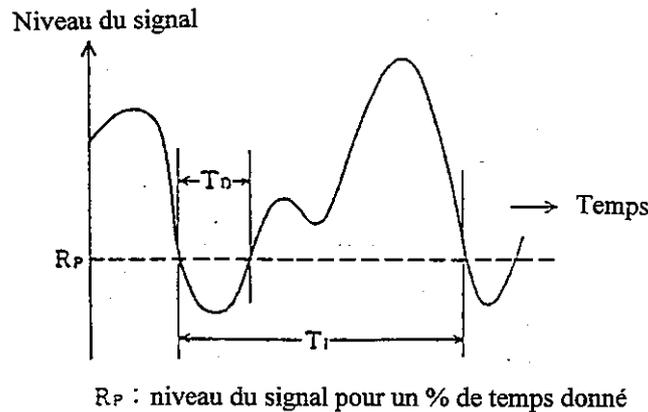


FIGURE 8.10

### Définition de la durée des évanouissements et de l'intervalle entre évanouissements

En théorie, il est possible d'estimer  $\langle T_D \rangle$  et  $\langle T_I \rangle$  à partir du spectre puissance/fréquence lorsque le processus est gaussien [Papoulis, 1965]. Cette méthode théorique reste valable pour les évanouissements par trajets multiples causés par les réflexions sur la surface de la mer [Karasawa et Shiokawa, 1987]. La Figure 8.11 compare les valeurs mesurées de  $\langle T_D \rangle$  et  $\langle T_I \rangle$  et les valeurs estimées à partir des spectres de puissance. Les fonctions de densité de probabilité de  $T_D$  et  $T_I$  sont très proches des distributions exponentielles.

En se fondant sur la relation existant entre la durée des évanouissements et le spectre de puissance, on a élaboré la méthode de prévision simplifiée de la Recommandation UIT-R P.680 pour  $\langle T_D \rangle$  et  $\langle T_I \rangle$  en fonction de la largeur de bande spectrale à -10 dB. Dans la plupart des cas, les erreurs de prévision se situent en deçà de 10% pour le SMMS [Karasawa et Shiokawa, 1987].

#### 8.2.2.3.5 Largeur de bande de corrélation et taux d'erreur irréductible

Dans le cas du SMAS, la différence de marche peut être très grande entre l'onde directe et l'onde réfléchi sur la surface de la mer; par ailleurs, les évanouissements par trajets multiples peuvent avoir une sélectivité en fréquence. Karasawa et autres [1990b] ont calculé la largeur de bande de corrélation en fonction de la hauteur de l'antenne; les résultats sont donnés dans la Recommandation UIT-R P.682.

Les évanouissements sélectifs en fréquence dus aux trajets multiples dans des canaux utilisés par des services mobiles donnent lieu à un taux d'erreur irréductible au-dessous duquel des augmentations de la puissance du signal direct ne permettent pas de descendre. Des simulations d'une liaison mobile aéronautique par satellite ont été faites à l'aide d'un signal avec modulation à déplacement de phase minimal à codage par transition [Davarian, 1988]. Le signal composite (signal direct plus signal diffusé) a été modélisé à l'aide de statistiques de Rice, et le signal réfléchi a été dûment décalé dans le temps par rapport au signal direct. Le signal composite a été détecté de manière différentielle et on a mesuré le taux d'erreur sur les bits.

Les résultats ont montré que le taux d'erreur irréductible est plus élevé pour un canal mobile aéronautique par satellite que pour un canal mobile terrestre par satellite. Un temps de propagation plus long pour la composante "trajets multiples" entraîne une augmentation du taux d'erreur irréductible. D'autres études [Hagenauer et autres, 1987; Korn, 1989] confirment ces résultats et montrent qu'une augmentation de la puissance des trajets multiples ou de leur temps de propagation augmente le taux d'erreur irréductible.

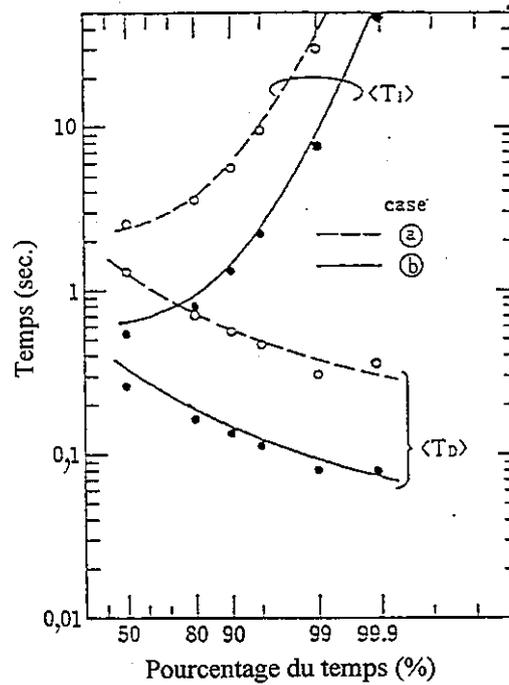


FIGURE 8.11

**Valeurs moyennes de la durée des évanouissements et de l'intervalle entre évanouissements en fonction du niveau de seuil correspondant à un pourcentage de temps compris entre 50% et 99,9%**

(Les points et les petits cercles correspondent à des données de mesure; les deux courbes sont des estimations faites à partir des spectres de puissance respectifs.)

Cas	Angle d'élévation	Hauteur des vagues	Vitesse de déplacement du navire	Roulis du navire
a	5°	0,5 m	11 noeuds	1 °
b	10°	3 m	11 noeuds	5°

**8.2.3 Effet d'écran et occultation**

On peut considérer que l'effet d'écran et d'occultation dû à la présence d'arbres, de bâtiments ou d'autres structures naturelles ou artificielles est la principale cause de dégradation des signaux pour les systèmes de communication du service mobile par satellite. Les signaux reçus de derrière des arbres auront une composante en visibilité directe, réduite par l'absorption due à la traversée de la canopée, et une composante aléatoire due à la diffusion par les arbres. Lorsque le trajet du signal est occulté par une structure compacte (par exemple un bâtiment) il n'y a pratiquement pas de composante directe et la liaison de communication ne peut être établie qu'en utilisant les trajets de l'onde diffractée et de l'onde réfléchie. Il faut bien comprendre les différents effets d'écran pour définir les limites de la zone de couverture, la qualité de service et les marges de liaison.

**8.2.3.1 Effet d'écran dû aux arbres**

L'affaiblissement dû aux arbres est lié à l'absorption par les feuilles et à l'occultation par les troncs et les branches. L'importance du phénomène d'absorption par les feuilles dépend du type, des dimensions des feuilles et de leur teneur en eau. Le phénomène d'occultation par les troncs dépend essentiellement de leur taille. Les arbres sont à l'origine non seulement d'un affaiblissement du

signal direct mais aussi de l'existence d'une composante incohérente due aux signaux réfléchis et diffractés à la surface des arbres. Le Tableau 8.2, extrait de Goldhirsh et Vogel [1992] donne les niveaux mesurés de l'affaiblissement pour plusieurs types d'arbres et une fréquence de 870 MHz. Des niveaux de crête de l'affaiblissement de plus de 15 dB ont été observés.

**TABLEAU 8.2**  
**Récapitulatif de l'affaiblissement dû à un seul arbre à une**  
**fréquence de 870 MHz [Goldhirsh et Vogel, 1992]**

Type d'arbre	Affaiblissement (dB)		Coefficient d'affaiblissement (dB/m)	
	Le plus important	Moyenne	Le plus important	Moyenne
Chêne à gros glands	13,9	11,1	1,0	0,8
Poire Callery	18,4	10,6	1,7	1,0
Houx	19,9	12,1	2,3	1,2
Érable de Norvège	10,8	10,0	3,5	3,2
Chêne imbriqué	8,4	6,3	0,85	0,6
Chêne imbriqué	18,4	13,1	1,85	1,3
Pinède	17,2	15,4	1,3	1,1
Sassafras	16,1	9,8	3,2	1,9
Pin sauvage	7,7	6,6	0,9	0,7
Pin Weymouth (sapin blanc)	12,1	10,6	1,5	1,2
Moyenne globale	14,3	10,6	1,8	1,3

Le Tableau 8.2 montre que les variations du coefficient d'affaiblissement moyen peuvent être très importantes; la valeur moyenne globale est de 1,3 dB/m. Une loi de similitude en fréquence pour le coefficient d'affaiblissement a été établie à partir de ces valeurs moyennes [Goldhirsh et Vogel, 1992].

$$\alpha_1 = \alpha_0 \sqrt{\frac{f_1}{f_0}} \text{ dB / m} \quad (8.20)$$

où  $\alpha_0$  et  $\alpha_1$  sont respectivement les coefficients d'affaiblissement aux fréquences  $f_0$  et  $f_1$ .

On trouve dans la littérature plusieurs autres relations empiriques exprimant le coefficient d'affaiblissement en fonction de la fréquence. Trois d'entre elles sont données ci-après:

Benzair et autres, [1991]:  $\alpha = 0,79 f^{0,61}$  (8.21a)

Weissberger et Hauber, [1982]:  $\alpha = 0,45 f^{0,284}$  (8.21b)

Simmons, [1981]:  $\alpha = 1,102 + 1,48 \log f$  (8.21c)

où  $f$  est la fréquence en GHz.

L'équation (8.21) repose sur des mesures faites à plusieurs fréquences (entre 1 et 4 GHz à des intervalles de 500 MHz) derrière un arbre feuillu. L'équation (8.21b) est basée sur des mesures faites dans des zones boisées à des fréquences comprises entre 100 MHz et 3,2 GHz; l'équation (8.21c) est basée sur des mesures faites à des fréquences comprises entre 9,5 et 90 GHz.

Les courbes respectives de toutes ces relations empiriques sont tracées à la Figure 8.12 qui donne également la relation de l'équation (8.20) dans laquelle on suppose que  $\alpha_0$  est égale à 1,3 dB/m à 870 MHz. On peut voir que les quatre courbes sont très distinctes les unes des autres. Les différences peuvent s'expliquer par la méthode de mesure utilisée, le type d'arbre considéré pendant les mesures et la taille limitée des échantillons utilisés pour chaque mesure. La fourchette de variation de  $\alpha$  à 1,5 GHz est comprise entre 0,5 et 1,7 dB/m et suit de près la ligne d'évolution indiquée dans le Tableau 8.2. Pour des mesures faites avec des récepteurs mobiles en milieu rural, il semble que l'on tombe dans la même fourchette. Compte tenu des résultats disponibles, un coefficient d'affaiblissement moyen d'environ 1,0 dB/m semble adapté pour les fréquences de la bande L.

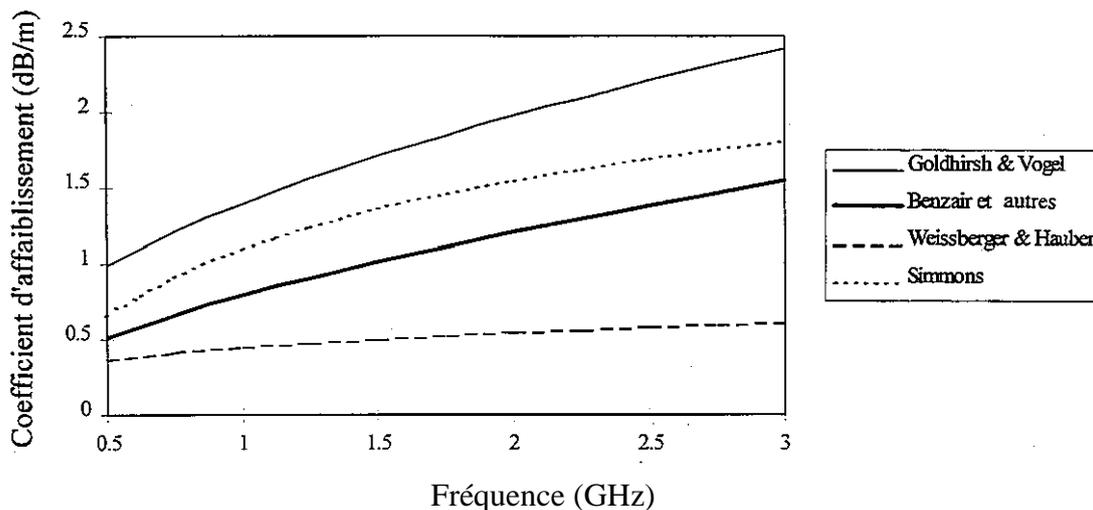


FIGURE 8.12

**Comparaison de plusieurs relations empiriques donnant le coefficient d'affaiblissement dû aux arbres en fonction de la fréquence**

Ces résultats s'appliquent à des arbres qui ont toutes leurs feuilles. L'affaiblissement dû aux arbres sans feuilles est plus faible et on constate que la réduction de l'affaiblissement est proportionnelle à l'affaiblissement total observé lorsque l'arbre a toutes ses feuilles. Les facteurs de réduction moyens déterminés de façon empirique se situent entre 0,36 [Goldhirsh et Vogel, 1992] et 0,44 [Weissberger et Hauber, 1982].

L'intensité du signal direct reçu, lorsqu'il y a un arbre entre le point d'émission et le point de réception de ce signal dépendra de l'orientation du trajet du signal par rapport à cet arbre. La quantité de matière absorbante le long du trajet déterminera le degré de l'affaiblissement, on peut donc considérer qu'en moyenne, la longueur du trajet du signal sur lequel se trouve l'arbre est un paramètre important dans la détermination du niveau du signal. La longueur du trajet est fonction de

l'angle d'élévation et de la distance qui sépare le récepteur et l'arbre. On peut considérer que l'affaiblissement moyen dû à un arbre isolé est le produit du coefficient d'affaiblissement et de la longueur du trajet sur lequel se trouve cet arbre. La longueur du trajet à travers la canopée dépendra de la forme de la canopée et de l'orientation du trajet du signal dans la canopée. Selon le type d'arbre considéré, la canopée peut être modélisée sous l'une des formes suivantes: cône, sphère, ellipsoïde aplatie ou tétraèdre. Pour des angles d'élévation moyens (20° à 50°) l'affaiblissement est pratiquement indépendant de l'altitude, la dépendance vis-à-vis de l'altitude ne devenant importante qu'aux extrémités supérieure et inférieure de la fourchette des angles d'élévation. Si l'on considère la variabilité de la longueur du trajet comme un paramètre statistique, il est possible de modéliser un arbre en donnant un affaiblissement moyen et une distribution autour de cet arbre. La composante cohérente et la composante incohérente varieront en fonction de la position du récepteur et on devrait observer une parfaite décorrélation du signal sur des distances de quelques longueurs d'ondes.

D'une façon générale il n'existe pas de bons modèles statistiques donnant toutes les caractéristiques de l'affaiblissement par les arbres. Des mesures *in situ* de l'affaiblissement par des arbres isolés à des fréquences voisines de 1 GHz ont été effectuées par plusieurs chercheurs, notamment Goldhirsh et Vogel [1987], Benzair et autres [1991] et Ulaby et autres [1990]. Certaines de ces mesures ont été faites avec des antennes à faible gain; il se peut donc que d'autres éléments, par exemple les réflexions sur la surface, influent sur ces résultats. On dispose également de plusieurs études sur l'affaiblissement dans des forêts denses. (Voir les résumés de Weissberger et Hauber [1982] et Simmons [1981].) Par ailleurs, des mesures ont été faites avec des véhicules se déplaçant en milieu rural, là où la principale cause de dégradation des signaux est l'effet d'écran dû aux arbres [Goldhirsh et Vogel, 1992; Jongejans et autres [1986].

On a pu constater que les distributions de la valeur mesurée de l'intensité du signal, lorsque des arbres isolés se trouvent sur le trajet de ce signal suivent une distribution normale ou log-normale. Une distribution log-normale convient peut-être mieux en raison du processus d'incrémentation indépendant associé aux différentes composantes sources d'affaiblissement (feuilles, brindilles, branches, etc.). La distribution log-normale est définie par deux paramètres, à savoir l'écart moyen et l'écart type, et s'exprime sous la forme suivante:

$$P(A > A_0) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[ \frac{\ln A - \ln A_m}{\sqrt{2}\sigma} \right] \quad (8.22)$$

où  $A$  est l'affaiblissement,  $P(A > A_0)$  est la probabilité pour que l'affaiblissement dépasse la valeur spécifiée  $A_0$ ,  $A_m$  est la valeur moyenne de  $A$  et  $\sigma$  est l'écart type de  $\ln(A)$ .

La valeur moyenne de l'affaiblissement peut être déduite du coefficient d'affaiblissement, une fois déterminée la longueur moyenne du trajet à travers la canopée. Il est probable que l'écart type dépendra de l'affaiblissement moyen. Toutefois, dans le cas d'un affaiblissement dû à un seul arbre, cette relation de dépendance ne devrait pas être très marquée. Il ressort à l'évidence de données de mesure de différentes sources [Benzair et autres, 1991; Jongejans et autres, 1986] que l'écart type se situe entre 0,3 et 0,5. Sur la base d'un écart type de 0,4, la Figure 8.13 donne la distribution résultante pour 3 valeurs de l'affaiblissement moyen: 8, 10 et 12 dB.

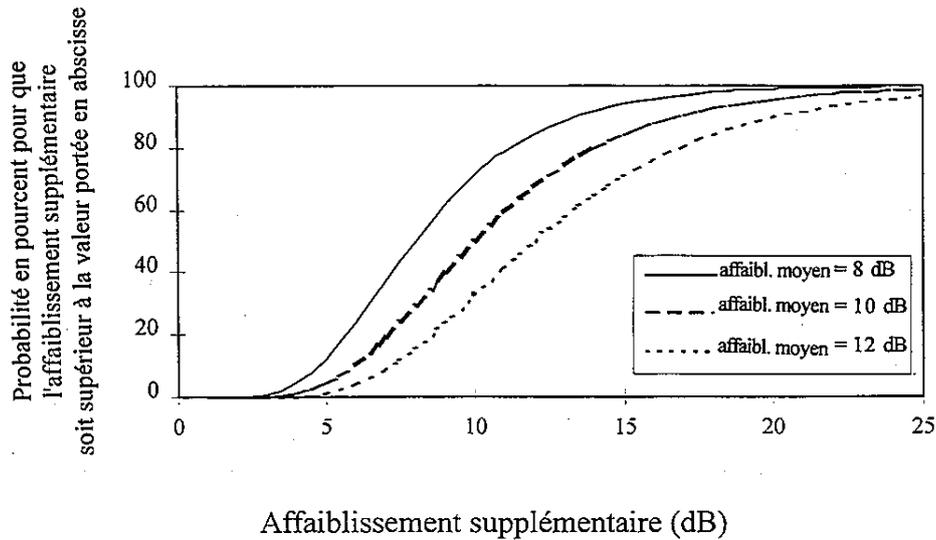


FIGURE 8.13

**Probabilité de l'affaiblissement dû aux arbres pour 3 niveaux de l'affaiblissement moyen**

Le signal incohérent résultant de la somme des nombreuses composantes à diffusion aléatoire est caractérisé par la puissance (l'intensité) de ces composantes par rapport à l'intensité du signal direct (rapport porteuse/trajets multiples  $C/M$ ). Comme cela a déjà été dit la composant aléatoire est assez faible même lorsque le signal direct subit un évanouissement important. Des mesures faites avec des voitures en milieu rural dans lequel les arbres sont la principale cause d'apparition de la composante incohérente donnent à penser que les valeurs du rapport  $C/M$  sont supérieures à 12 dB.

**8.2.3.2 Effet d'écran dû aux bâtiments**

Le signal derrière les zones d'ombre des bâtiments est reçu essentiellement par diffraction et réflexion. Il n'y a pas en général de composante en visibilité directe, ce qui fait qu'il n'est pas possible de définir l'effet d'écran de façon non ambiguë comme dans le cas de l'affaiblissement par les arbres. Toutefois, une définition plus lâche pourrait assimiler l'effet d'écran au rapport de puissance entre le niveau moyen du signal reçu et le niveau du signal direct ne subissant pas d'effet d'écran.

La théorie de la diffraction en arête permet d'étudier le phénomène de diffraction dû aux bâtiments. Cette méthode ne permet pas d'obtenir des résultats rigoureusement exacts mais donne une estimation raisonnable. Une vue théorique du phénomène de diffraction en arête est illustrée à la Figure 8.14 dans laquelle l'intensité relative du signal est indiquée dans la zone d'ombre et dans la zone illuminée. La Figure 8.14 a) montre l'affaiblissement dû à la présence de l'obstacle, exprimé en fonction d'un paramètre sans dimension  $v$  et la Figure 8.14 b) illustre la géométrie du trajet dans le cas de la zone illuminée et dans le cas de la zone d'ombre afin de calculer le paramètre  $v$ . La Recommandation UIT-R P.526 donne:

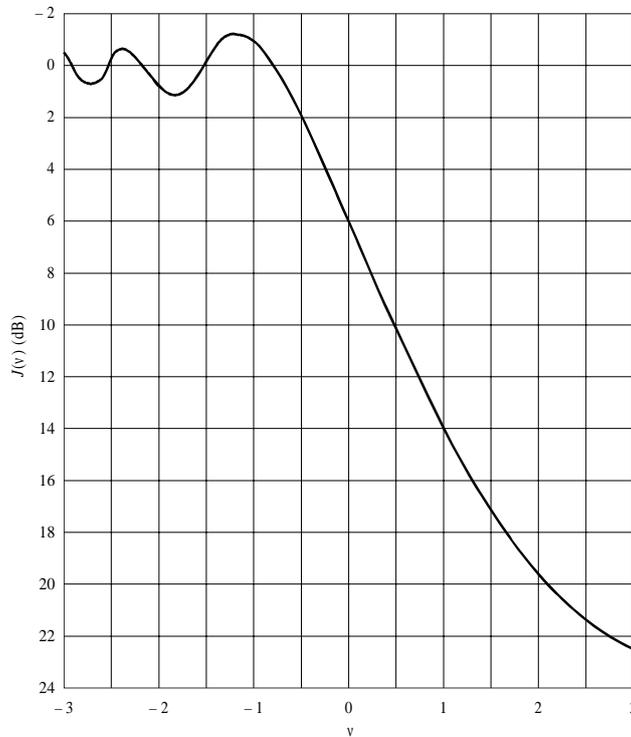
$$v = \theta \sqrt{\frac{2}{\lambda \left( \frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)}} \quad (8.23)$$

mais  $d_1 \gg d_2$  de sorte que:

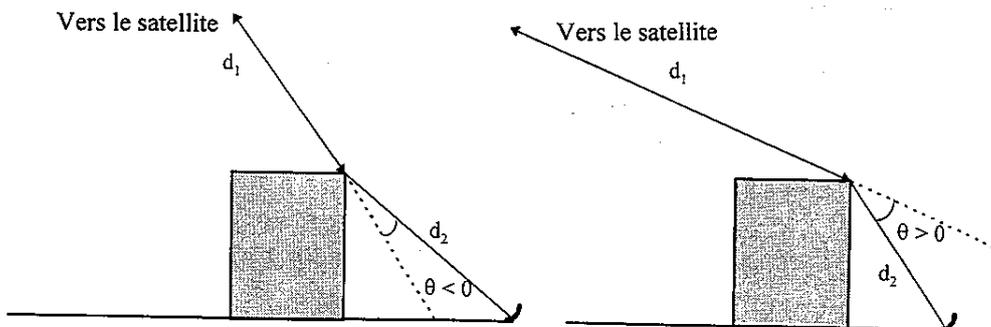
$$v \approx \theta \sqrt{\frac{2}{\lambda \left( \frac{1}{d_2} \right)}} = \theta \sqrt{\frac{2d_2}{\lambda}} \quad (8.24)$$

L'intensité du signal à la limite de la zone d'ombre est de 6 dB inférieure au niveau du signal en visibilité directe. Dans la zone illuminée, le signal subit des fluctuations en raison du brouillage entre la composante directe et la composante diffractée. Une fois à l'intérieur de la zone d'ombre, l'affaiblissement par effet d'écran croît rapidement. Une étude expérimentale de l'effet d'écran dû aux bâtiments [Yoshikawa et Kagohara, 1989] confirme que la théorie de la diffraction en arête s'applique. On a constaté que la valeur mesurée de l'intensité du signal derrière un bâtiment à diverses distances est conforme à la prévision qui avait été faite sur la base d'une seule arête de diffraction. Toutefois, lorsque la largeur des bâtiments est faible par rapport à la hauteur, l'effet d'écran peut être beaucoup moins important que ce qui avait été prévu d'après la méthode ci-dessus. On trouve dans la Recommandation UIT-R P.526 une méthode pour des écrans à largeur finie.

Lorsque le trajet du signal direct est occulté par un bâtiment, il est peu probable que le phénomène de diffraction par les bâtiments joue un rôle déterminant dans l'établissement de la liaison de communication, à moins que le terminal de communication ne soit situé à proximité de la limite de la zone d'ombre. Cela étant, les réflexions peuvent parfois jouer un rôle utile comme dans le cas des systèmes cellulaires de Terre.



a) Affaiblissement dû à une diffraction en arête au niveau de l'arête d'un bâtiment



b) Géométrie d'une diffraction en arête - pour le calcul de  $v$

FIGURE 8.14

La pénétration dans les bâtiments dépend du type de matériau de construction et de l'emplacement à l'intérieur du bâtiment. L'affaiblissement par la structure externe, appelé affaiblissement de pénétration, est défini comme étant la différence entre le niveau médian du signal mesuré immédiatement à l'extérieur du bâtiment à 1,5 m au-dessus du sol et celui mesuré immédiatement à l'intérieur du bâtiment à un niveau de référence à l'étage considéré. Il ressort de mesures faites à 940 MHz dans une ville moyenne des États-Unis qu'au rez-de-chaussée de bâtiments de bureaux typiques en pierre et en béton, l'affaiblissement de pénétration moyen est d'environ 10 dB pour un écart type d'environ 7 dB. Dans une autre série de mesures effectuées dans une grande ville on a obtenu un affaiblissement de pénétration moyen au sol de 18 dB pour un écart type de 7,7 dB [Walker, 1983]. La diminution globale de l'affaiblissement de pénétration en fonction de la hauteur était d'environ 1,9 dB par étage. Le Tableau 8.3 [IEEE, 1988] donne l'affaiblissement de pénétration moyen pour plusieurs matériaux de construction courants. La valeur de l'affaiblissement par le verre est située entre 2 et 6 dB selon le type de verre: dans le cas d'un verre normal, l'affaiblissement est moins important que dans le cas d'un verre teinté ou traité contenant des composantes métalliques.

TABLEAU 8.3

**Affaiblissement selon les matériaux de construction**

<b>Matériau de construction</b>	<b>Affaiblissement moyen (dB)</b>	<b>Écart type (dB)</b>
Mur de béton de 8 pouces	7	1
Revêtement extérieur en bois et en briques	3	0,5
Revêtement extérieur en aluminium	2	0,5
Murs métalliques	12	4
Affaiblissement par le mobilier de bureau (dB/m)	1	0,3

L'affaiblissement à l'intérieur d'un bâtiment est fonction de la distance par rapport au mur extérieur occultant le trajet du signal et de l'aménagement intérieur. À la suite de mesures on a obtenu des lois de variation de l'affaiblissement inversement proportionnelle aux puissances 2 à 4 de la distance.

Des mesures de l'affaiblissement dans les bâtiments ont été faites à l'aide de signaux de satellite [Wells, 1977]. Des mesures ont été faites dans plusieurs maisons individuelles aux États-Unis à 860, 1 550 et 2 596 MHz avec le satellite ATS-6. Les maisons utilisées pour les mesures avaient pour la plupart une charpente en bois avec du bois ou un matériau similaire à l'extérieur et une charpente en bois avec un parement en briques. À 1 550 MHz, le niveau moyen de l'affaiblissement dû aux bâtiments était de 6,7 dB. Le niveau de l'affaiblissement était beaucoup plus élevé dans des maisons isolées avec un matériau à base d'aluminium. L'affaiblissement augmente avec la fréquence avec une sensibilité d'environ 1 dB/GHz. L'emplacement de la pièce à l'intérieur de la maison avait très peu d'influence sur le niveau du signal reçu, la variation moyenne étant de l'ordre de 0,6 dB. Avec des extérieurs en briques l'affaiblissement a été d'environ 1,2 dB supérieur à celui observé avec des extérieurs en bois. Il n'y a pas de loi de dépendance nette avec l'angle d'élévation. Dans le cas d'une polarisation horizontale l'affaiblissement était d'environ 1,8 dB plus important que dans le cas d'une polarisation verticale.

Il est possible de calculer le niveau moyen du signal à l'intérieur d'un bâtiment en tenant compte de l'affaiblissement de pénétration et d'une loi de variation inversement proportionnelle à la distance à l'intérieur du bâtiment; une loi de variation inversement proportionnelle au cube de la distance peut

donner une approximation raisonnable. On peut aussi utiliser l'entrée du Tableau 8.3 correspondant à "affaiblissement par le mobilier de bureau" pour obtenir l'affaiblissement depuis le mur extérieur jusqu'à un point donné à l'intérieur d'une pièce. Une composante variable suivant une distribution de Rayleigh se superpose au niveau moyen du signal.

#### **8.2.4 Évanouissements dans le service mobile aéronautique par satellite sous l'effet des réflexions au sol**

Une expérience a été effectuée à bord d'un hélicoptère volant au-dessus des terres: il s'agissait de recevoir des signaux de radiobalise à 1,5 GHz en polarisation circulaire dextrogyre, en provenance du satellite MARISAT de la Région de l'océan Indien, sous un angle d'élévation de 10° [Karasawa et autres, 1990b]. Les profondeurs d'évanouissement mesurées au-dessus de terrains tels que des rizières étaient assez grandes (environ 5 dB), presque égales à celles produites par des réflexions sur la surface de la mer; les profondeurs mesurées au-dessus de zones montagneuses ou urbaines étaient inférieures à 2 dB. Dans le cas des zones montagneuses, il y a une plus grande probabilité pour que les montagnes occultent ou diffusent les ondes réfléchies. Dans les zones urbaines, les bâtiments ont aussi une forte action d'occultation ou de diffusion sur les ondes réfléchies. Pour cette raison, les évanouissements par trajets multiples après réflexion sur le sol ne sont pas en général importants dans ces cas.

On trouve dans la Recommandation UIT-R P.682 des résultats de mesures obtenus avec le satellite ATS-6 [Schroeder et autres, 1976].

#### **8.2.5 Brouillage causé par les systèmes à satellites adjacents**

##### **8.2.5.1 Généralités**

Dans les systèmes de télécommunication mobiles à satellites pour les navires, les aéronefs et les véhicules automobiles, il est indispensable d'utiliser de petites antennes dans les mobiles, pour des raisons d'ordre opérationnel ou économique. On a donc été amené à réaliser un certain nombre de systèmes de stations terriennes mobiles à faible rapport  $G/T$ , équipés de petites antennes. Il faut signaler, cependant, que ces antennes sont soumises à certaines contraintes: limitation de l'efficacité d'utilisation des fréquences, ou coexistence entre deux systèmes à satellites (ou plus) dans la même bande de fréquences, et/ou chevauchement des zones de service quand les deux satellites sont visibles. Pour coordonner deux systèmes différents dans la même bande de fréquences, on a besoin, pour l'évaluation des brouillages, d'un modèle extrêmement fiable, applicable à la fois au système brouilleur et au système brouillé.

Ce problème a été étudié en particulier par la Commission d'études 8 de l'UIT-R. L'élaboration du modèle en question est une question urgente pour l'UIT-R, étant donné que l'on prévoit la mise en place de plusieurs systèmes mobiles à satellites.

Dans les systèmes mobiles à satellites, l'amplitude du signal utile provenant du satellite et celle d'un signal brouilleur émanant d'un satellite adjacent subissent des fluctuations indépendantes en raison de l'évanouissement par trajets multiples, ce qui exige, par rapport aux systèmes fixes à satellites, un traitement différent. Le point technique essentiel est une formulation des statistiques d'évanouissement différentiel, c'est-à-dire la différence d'amplitude entre deux signaux.

La méthode décrite au § 5 de la Recommandation UIT-R P.680 est une méthode pratique de prévision pour le rapport signal/brouillage, dans laquelle on tient compte de l'effet du bruit thermique et du brouillage ayant les caractéristiques d'un bruit, dans l'hypothèse suivante: l'amplitude du signal utile et celle du signal brouilleur, qui subissent des évanouissements par trajets multiples après réflexion sur la surface de la mer, obéissent à des distributions de Nakagami-Rice.

Cette situation a une grande probabilité d'occurrence dans les systèmes de télécommunication maritimes par satellite.

### 8.2.5.2 Hypothèses de base du modèle

La Figure 8.15 illustre un exemple de brouillage entre des systèmes à satellites adjacents: a) "brouillage sur le trajet descendant" qui intéresse la station terrienne mobile, et b) "brouillage sur le trajet montant" qui intéresse le satellite.

Ces considérations s'appliquent à des systèmes multiples fonctionnant dans la même bande de fréquences. On peut prévoir que le brouillage pose un problème particulièrement difficile lorsque le satellite brouilleur est vu du navire (Figure 8.15) sous un petit angle d'élévation; en effet, le niveau maximum du signal brouilleur, dans le cas des évanouissements par trajets multiples, s'élève quand l'angle d'élévation diminue. On peut citer une autre situation: brouillages entre faisceaux dans l'exploitation à plusieurs faisceaux ponctuels, où la même fréquence est attribuée de façon répétée.

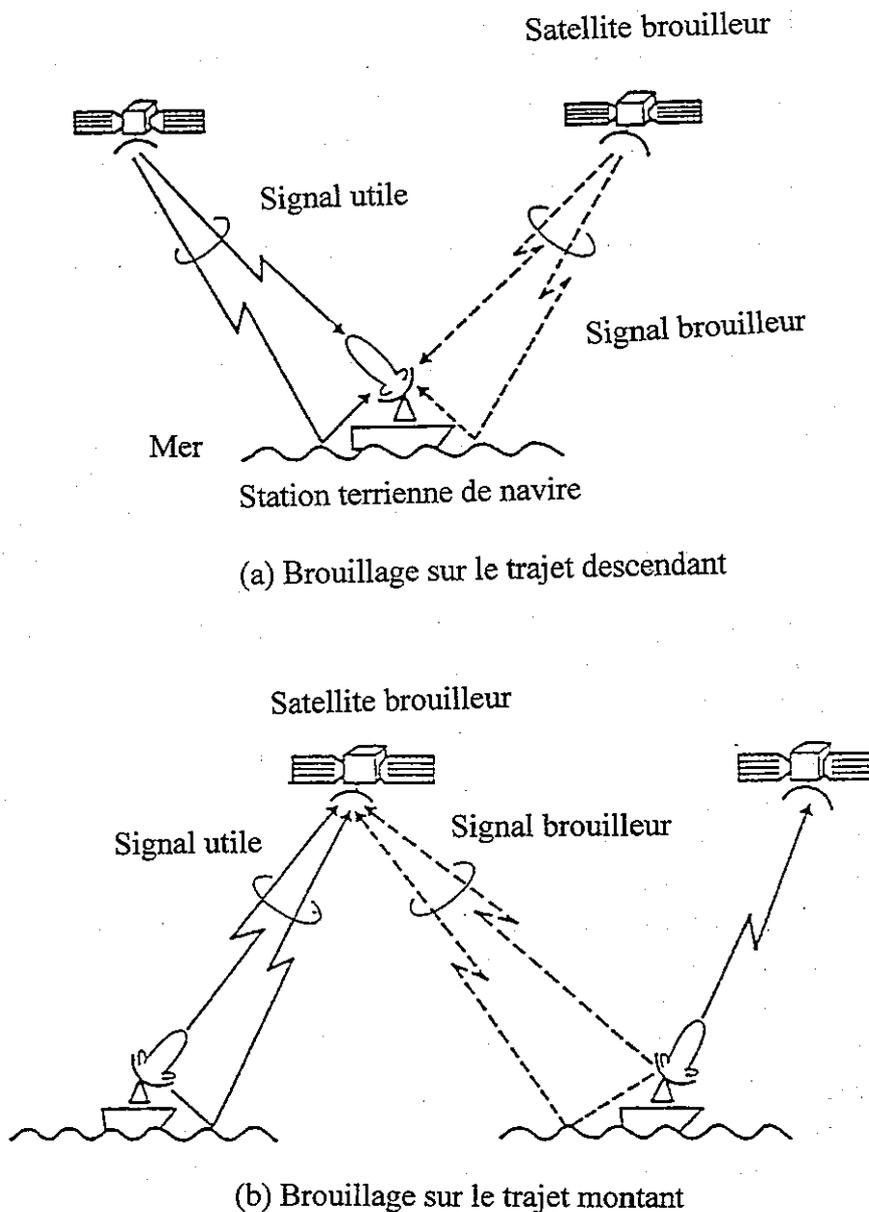


FIGURE 8.15

**Brouillages mutuels entre systèmes à satellites adjacents**

Les hypothèses de base adoptées pour le modèle sont les suivantes [Karasawa et Yasunaga, 1991]:

- a) L'amplitude du signal utile et celle du signal brouilleur obéissent à des distributions de Nakagami-Rice, avec une distribution de Rayleigh pour le signal brouilleur. Il n'y a aucune corrélation entre les variations d'amplitude des deux signaux.
- b) Le bruit thermique ( $n$ ) est invariable dans le temps.
- c) Le brouillage agit comme un bruit thermique: lorsqu'il y a présence simultanée d'un signal brouilleur et d'un bruit thermique, on peut obtenir une puissance de bruit équivalent ( $n_e$ ) en additionnant la puissance du brouillage ( $i$ ) et la puissance du bruit thermique ( $n_e = n + i$ ).

### 8.2.5.3 Degré d'exactitude des prévisions

On a évalué le degré d'exactitude de ce modèle en le comparant à un modèle théorique rigoureux qui satisfait aux hypothèses énoncées plus haut [Karasawa et Yasunaga, 1991]. Dans tous les cas où les valeurs des paramètres étaient comprises dans les intervalles spécifiés ci-après (paramètres  $D$ : puissance de l'onde directe du signal utile;  $N$ : valeur moyenne de la puissance de bruit du système;  $M$ : valeur moyenne de la puissance du signal utile se propageant par trajets multiples;  $I$ : valeur moyenne du brouillage):

$$N/D \leq -5 \text{ dB}; M/D \leq -5 \text{ dB}; I/D \leq -10 \text{ dB}$$

l'écart maximum de la valeur prévue ( $\epsilon_{max}$ ) pour chaque pourcentage, avec:

$$\epsilon_{max} \text{ (dB)} = \max ( | [\text{valeur estimée par la méthode simple}] - [\text{valeur rigoureuse}] | )$$

avait les valeurs suivantes:

$p$ (%):	80	90	99	99,9	99,99
$\epsilon_{max}$ (dB):	0,24	0,34	0,55	0,66	0,71

L'erreur maximum augmente en même temps que le pourcentage de temps,  $p$ . Cependant, dans le cas usuel où la dégradation de  $[c/(n+i)]$ ;  $c$  = puissance du signal utile] est très grande (inférieure à  $D/N$ , de 10 à 20 dB environ), l'erreur est relativement faible. De plus, l'erreur a tendance à évoluer vers une valeur d'estimation "prudente", ce qui semble être souhaitable pour la prévision du brouillage.

### 8.2.6 Problème traité à titre d'exemple

Pour illustrer certaines des notions qui ont été présentées dans les sections précédentes de ce chapitre, on calcule ici l'évanouissement pour un système du service mobile terrestre par satellite. La géométrie et les paramètres de la liaison sont les suivants: réception à des latitudes moyennes de signaux d'un satellite géostationnaire par un système du service mobile terrestre par satellite fonctionnant en visibilité directe. On notera que les coefficients de réflexion utilisés dans cet exemple doivent être calculés à partir de sources de référence (voir la Figure 8.1 du présent manuel; voir également la Recommandation UIT-R P.527).

*Paramètres du système:*

Signal de transmission:	1 GHz, polarisation circulaire
Angle d'élévation $\theta$	30° (angle de visée)
Antenne mobile	polarisation circulaire
Gain de l'antenne (copolaire), $g_{cr}$ :	4 dBi pour $\theta = 30^\circ$ 0 dBi pour $\theta < 0^\circ$
Gain de l'antenne (contrapolaire), $g_{xr}$ :	-6 dBi pour $\theta < 0^\circ$

*Influence de l'ionosphère:*

Il a été établi au Chapitre 7 que l'influence de l'ionosphère, à l'exception de la rotation de Faraday, était négligeable aux latitudes moyennes. Étant donné que les signaux transmis sont à polarisation circulaire, on ne tiendra pas compte de la rotation de Faraday (voir le § 5.3.1).

*Influence de la troposphère:*

On a pu constater au Chapitre 3 que les effets de l'affaiblissement étaient négligeables. Il ressort du Chapitre 6 que les conséquences de la réfraction seront négligeables pour des angles d'élévation de plus de 5°.

*Influence du sol:*

Dans l'exemple considéré:

- $R_{cs}$  et  $R_{xy}$ : coefficients de réflexion copolaire et contrapolaire pour une Terre incurvée et une onde incidente à polarisation circulaire;
- $\rho_s$ : facteur d'irrégularité du terrain (par rapport à  $S_h$ ; valeur efficace des irrégularités du terrain);
- D: facteur de divergence pour une Terre incurvée (= 1 pour toutes les conditions normales);
- $R_V$  et  $R_H$ : coefficients de réflexion pour une Terre plane et respectivement une polarisation verticale et une polarisation horizontale;
- $R_d$ : Composante de réflexion diffuse par rapport à la composante directe.

(Voir le § 8.2.1 pour une étude des phénomènes de réflexion à la surface de la Terre et la définition des termes.) On suppose ici que  $S_h = 0,1$  m et on utilise les coefficients de réflexion pour une Terre moyenne.

Étant donné que pour une station terrestre mobile (par exemple, une antenne montée à bord d'un véhicule),  $h = 0$ , on déduit de l'équation (8.4) que:

$$\varphi = \theta = 30^\circ$$

De l'équation (8.8), on obtient le paramètre d'irrégularité:

$$g = 4\pi (S_h/\lambda) \sin \varphi = 2,09$$

*Composante spéculaire:*

$$R_{cs} = \rho_s DR_c; R_{xs} = \rho_s DR_x \quad (\text{voir l'équation (8.5) et la définition au § 8.2.1.4.1})$$

$$\rho_s = \exp[-g^2/2] I_0[g^2/2] = 0,29 \quad (\text{voir l'équation (8.10)})$$

$$D = 1$$

$$R_V = 0,33; R_H = -0,77 \quad (\text{voir la Figure 8.1 pour une terre sèche, pour } \varphi = 30^\circ)$$

$$R_c = (R_H + R_V)/2 = (-0,77 + 0,33)/2 = -0,22$$

$$R_x = (R_H - R_V)/2 = (-0,77 - 0,33)/2 = -0,55$$

$$R_{cs} = (0,29)(1)(-0,22) = -0,064 \text{ ou } -23,9 \text{ dB} \quad \text{par rapport à l'onde directe}$$

$$R_{xs} = (0,29)(1)(-0,55) = -0,160 \text{ ou } -15,9 \text{ dB} \quad \text{par rapport à l'onde directe}$$

*Magnitude:*

Composantes directe et spéculaire

$|E|$  = somme des composantes directe et spéculaire.

$|E|$  = composante directe  $\pm$  (réflexions spéculaires copolaire + contrapolaire).

$|E|$  = champ de la composante directe  $[1 \pm (\text{gain de l'antenne copolaire en direction du point de réflexion spéculaire})(\text{coefficient de réflexion copolaire}) + (\text{gain de l'antenne contrapolaire en direction du point de réflexion spéculaire})(\text{coefficient de réflexion contrapolaire})]$

$$|E| = E_0 |1 \pm [g_{cr}(-60^\circ)R_{cs} + g_{xr}(-60^\circ)R_{xs}]|$$

$$|E| = E_0 |1 \pm [(0,63)(-0,064) + (0,316)(-0,16)]|$$

$$|E| = E_0 |1 \pm 0,0908|$$

ou

+0,75 dB à -0,83 dB par rapport à  $E_0$ , champ du signal direct.

La composante spéculaire, de 20,8 dB inférieure à la composante directe (rapport de 0,0908), ajoutée à l'onde directe donne une résultante qui variera de  $\pm 0,8$  dB de part et d'autre de l'onde directe ( $E_0$ ) pour un angle d'élévation de  $30^\circ$ . L'angle d'élévation du signal réfléchi à la surface de la Terre est supérieur à l'angle de Brewster et le sens de polarisation du signal est inverse de celui du signal direct.

*Composante diffuse:*

On suppose que la valeur moyenne de l'amplitude de la composante diffuse  $\langle |R_d| \rangle \approx 0,08$  (sur la base d'une valeur type de  $\rho_d = 0,35$  pour des surfaces très irrégulières et  $|R| = |-0,22| = 0,22$  calculé dans l'analyse de la composante spéculaire ci-dessus).

On suppose que la somme de la composante directe et de la composante spéculaire est  $E_0$  (c'est-à-dire qu'on ignore la composante spéculaire).

$$\text{Valeur du signal reçu résultant} = E_0 [1 + |R_d| g(\alpha)]$$

où  $|R_d|$  suit une distribution de Rayleigh et  $g(\alpha)$  est pris égal à 0,63 (ou -4 dB), gain copolaire de l'antenne de réception pour des angles en dehors de l'axe de visée de plus de 30°.

Le signal reçu résultant suit une distribution de Nakagami-Rice (voir la Recommandation UIT-R P.1057) illustré à la Figure 8.16. En raison de la discrimination de l'antenne, la valeur de  $\langle |R_d| \rangle g(\alpha)$  utilisée à la Figure 8.16 doit être  $(0,08)(0,63) = 0,05$ . Comme l'indique le symbole  $\oplus$  dans la figure, l'évanouissement du signal dû à la diffusion diffuse devrait dépasser environ 1 dB pendant 99,9% du temps en visibilité directe. Ce niveau d'évanouissement est très faible et n'a pas de conséquence majeure pour la conception des systèmes.

La même conclusion n'est pas valable en général dans le cas d'une diffusion à la surface de la mer (voir le § 8.2.2.3.1). De plus, comme l'indique l'équation (8.8), l'irrégularité effective d'une surface augmente avec la fréquence (ou inversement au fur et à mesure que  $\lambda$  décroît) de sorte que l'intensité relative de la composante diffuse augmentera avec la fréquence. (Cela étant, à des fréquences plus élevées, les antennes utilisées sont souvent plus directives et peuvent donc offrir une meilleure discrimination vis-à-vis de la composante diffuse.)

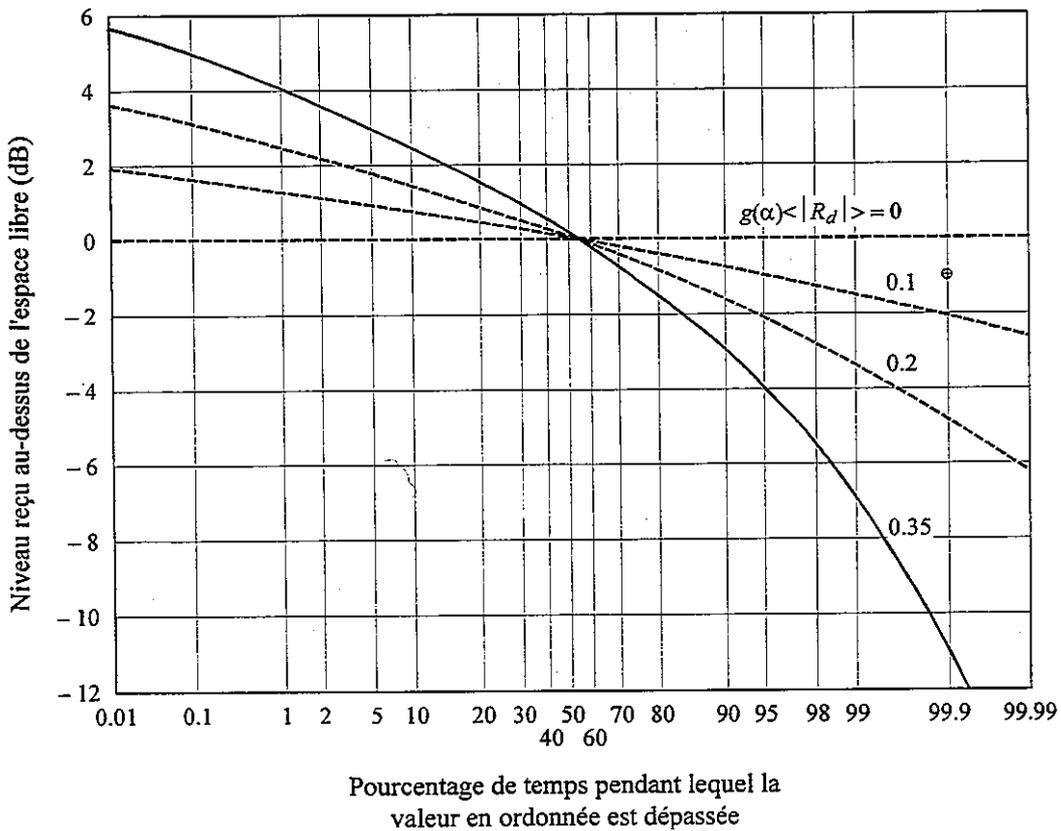


FIGURE 8.16

**Distribution d'amplitude (dB) d'un signal cohérent combiné à un signal réfléchi qui suit une distribution de Rayleigh (réduit par le gain d'antenne en dehors de l'axe de la visée  $g(\alpha)$ ) (d'après Beckmann et Spizzichino [1963])**

### 8.2.7 Résultats des mesures expérimentales

En raison de la complexité des phénomènes d'effet d'écran, d'occultation et de propagation par trajets multiples sur les trajets de propagation du SMS, en particulier pour les liaisons du SMTS, il faut très souvent s'appuyer sur des résultats empiriques pour élaborer les modèles de précision. Des résultats de mesures expérimentales sont présentés dans ce paragraphe pour illustrer les caractéristiques de dégradations et l'ampleur type des dégradations correspondantes du signal. Des données de mesures relatives aux caractéristiques des réflexions à la surface de la mer sont également présentées. Dans le cas du SMTS, les données provenant d'expérience conduites dans différents pays ont été récapitulées et jointes à un examen des résultats des modèles de propagation dans le SMTS [Goldhirsh et Vogel, 1992].

#### 8.2.7.1 Mesures pour le SMTS

Par commodité, l'accent est mis sur les résultats obtenus dans le SMTS à partir d'une série de mesures faites au Canada [Butterworth et Matt, 1983; Butterworth 1984], certaines avec des sources de satellites simulées, pour illustrer la dépendance entre les évanouissements et les paramètres du trajet de propagation.

La Figure 8.17 représente les fonctions de distribution obtenues pour des séries de mesures faites dans des conditions estivales (arbres avec feuilles). Un tiers de ces itinéraires traversait des zones boisées. Les mesures ont été répétées pour différentes altitudes de l'hélicoptère afin d'obtenir des angles d'élévation de 5°, 15° et 20° pour l'antenne de réception par rapport à la source d'émission. Au cours des mesures faites sous un angle d'élévation de 5°, on a observé, en plus d'évanouissements rapides dus à la propagation diffuse par trajets multiples, des évanouissements lents d'une profondeur d'environ 8 dB en terrain découvert. On en a déduit que les évanouissements lents étaient dus à des réflexions spéculaires. Ce phénomène n'a pas été observé sous des angles d'élévation plus élevés.

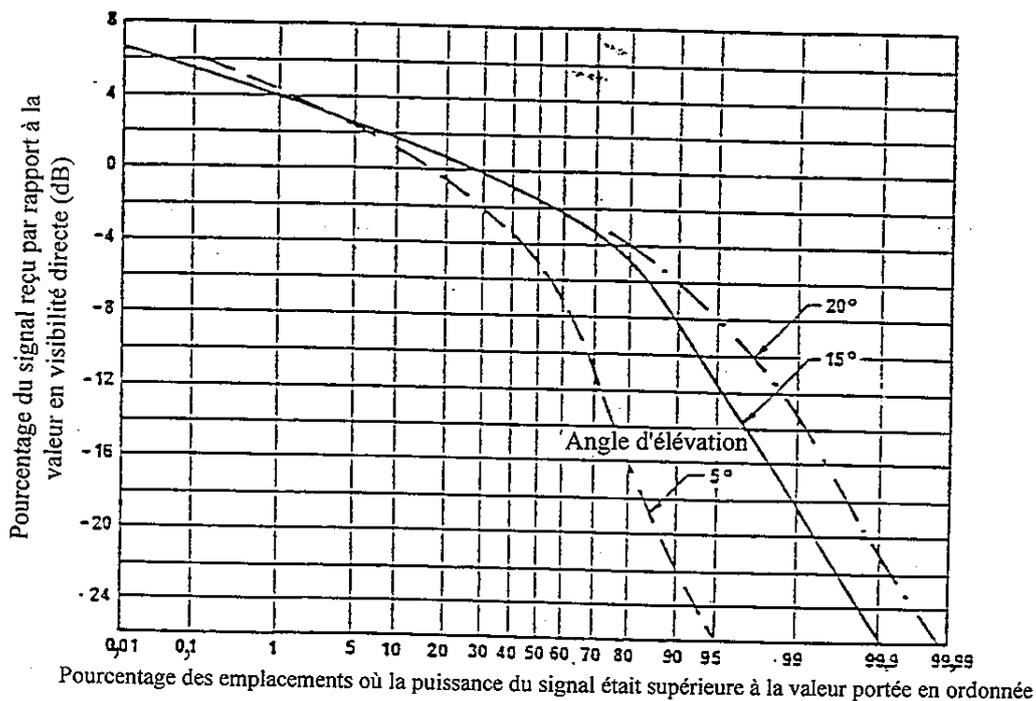


FIGURE 8.17  
Fonctions de distribution des données enregistrées  
à 870 MHz pour différents angles d'élévation

On a obtenu des résultats analogues en effectuant des mesures à 1 542 MHz, à l'aide du satellite MARECS-A, pour un angle d'élévation de 20° [Huck et autres, 1983]. Comme le montre la Figure 8.18, on a constaté que les caractéristiques d'évanouissement dépendaient de l'environnement local [Butterworth, 1984]. Une très bonne simulation des données d'essai typiques a été obtenue en supposant que les signaux se propageant par trajets multiples suivaient une distribution de Rayleigh, avec une puissance moyenne de 10 dB inférieure au signal direct sans affaiblissement. Les effets d'écran ont été simulés en supposant un effet d'affaiblissement log-normal pour le signal direct, avec un affaiblissement moyen type du signal direct de 7,5 dB et un écart type de 3 dB.

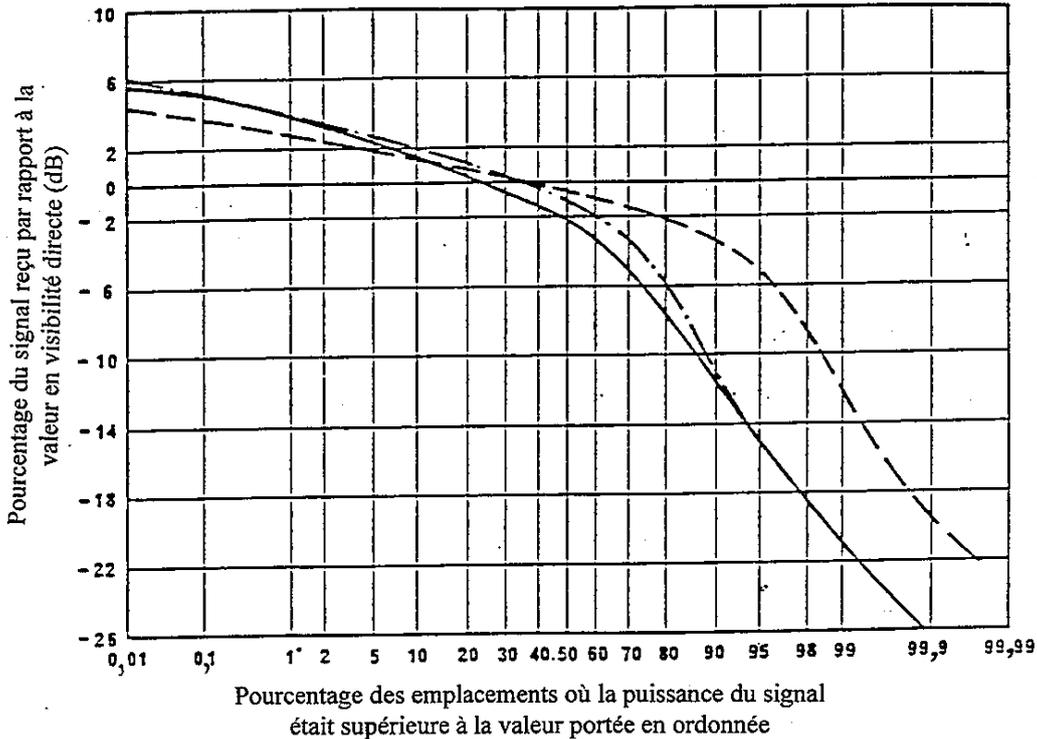


FIGURE 8.18

**Fonctions de distribution de l'enveloppe enregistrées à 1 542 MHz avec une polarisation circulaire et un angle d'élévation de 20° pour divers types de terrain**

- Zone suburbaine
- · - · - Zone rurale/forêt
- - - - - Zone rurale/exploitation agricole

Une comparaison directe est possible entre les données recueillies aux deux fréquences. Les mesures ont été effectuées à 870 MHz et 1 542 MHz sur des itinéraires de la zone d'essai, 35% de celle-ci étant composée de terrains boisés et le reste de terrain découvert. Les type d'antennes utilisés pour les deux fréquences étaient des antennes tourniquets à doublets croisés inclinés à polarisation circulaire, avec des diagrammes de rayonnement similaires et pour le même angle d'élévation de 20° pour la source. La Figure 8.19 représente graphiquement cette comparaison. Comme on pouvait le prévoir, en raison de l'augmentation en fonction de la fréquence de l'affaiblissement dû aux feuillages, l'affaiblissement supplémentaire dû au trajet est sensiblement plus grand à 1 542 MHz que l'affaiblissement à 870 MHz pour la couverture de la zone de la région considérée, c'est-à-dire de plus de 90%.

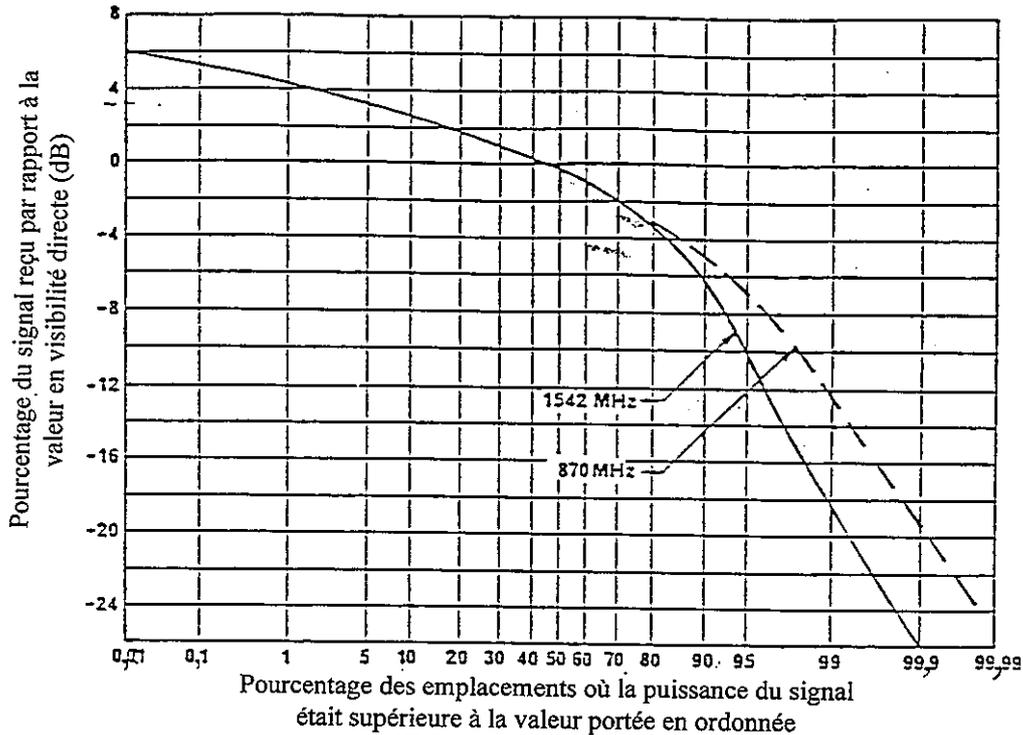


FIGURE 8.19

**Comparaison des données enregistrées à 870 MHz et 1 542 MHz dans la même zone d'essai avec le même type d'antenne, pour un angle d'élévation de la source de 20°**

Dans plusieurs mesures, on a établi une relation entre les dégradations de la discrimination entre la composante copolaire et la composante contrapolaire et l'évanouissement par trajets multiples correspondant du canal contrapolaire. Des distributions d'équiprobabilité des signaux copolaire et contrapolaire basées sur plusieurs séries de mesures du SMTS en Australie [Goldhirsh et Vogel, 1992] ont montré que la discrimination a chuté à environ 11 dB pour un affaiblissement copolaire de 5 dB. Par conséquent, il semble peu probable que la technique de réutilisation des fréquences avec canaux à double polarisation sur les trajets du service mobile par satellite donne de bons résultats en raison de la diffusion par trajets multiples dans le canal contrapolaire.

#### **8.2.7.2 Mesures des effets de la propagation par trajets multiples après réflexion sur la surface de la mer**

Une étude de propagation par trajets multiples sur 1,6 GHz a été effectuée avec un avion KC-135 et le satellite ATS-6 de la NASA [Schroeder et autres, 1976]. Les caractéristiques du signal ont été mesurées avec un réseau de guides d'onde à 2 éléments placé dans le radôme du nez de l'aéronef, les ouvertures de faisceau à 1 dB étant de 20° en azimut et 50° en élévation. Les données ont été recueillies au-dessus de l'océan et au-dessus du sol pour une altitude nominale de l'avion de 9,1 km et une vitesse nominale au sol de 740 km/h.

Le coefficient de diffusion quadratique moyen  $\Gamma$  est défini sous la forme:

$$\Gamma = G \frac{\langle |I|^2 \rangle}{\langle |D|^2 \rangle} \quad (8.25)$$

où:

- $G$ : est l'ajustement permettant de compenser les différences de gain entre les canaux direct et indirect;
- $\langle |I|^2 \rangle$ : est la puissance quadratique moyenne de la composante propagée par trajets multiples, mesurée au récepteur;
- $\langle |D|^2 \rangle$ : est la puissance quadratique moyenne de la composante directe mesurée au récepteur.

Les coefficients de polarisation horizontale et verticale d'antenne ont été mesurés pendant des expériences effectuées avec l'ATS-6. La Figure 8-20 indique les valeurs efficaces correspondant à des pentes à la surface de la mer de  $3^\circ$  et  $12^\circ$  en fonction de l'angle de site ainsi que des prévisions établies d'après un modèle optique physique [Staras, 1968]. On a constaté que la pente à la surface de la mer avait un effet peu important pour des angles de site supérieurs à  $10^\circ$  environ. La concordance entre les coefficients mesurés et les coefficients prévus pour une Terre plate, lisse, corrigée par le facteur de divergence pour une Terre sphérique augmente à mesure que la pente diminue. La relation entre la pente efficace à la surface de la mer et la hauteur des vagues est complexe mais la conversion peut être effectuée [Karasawa et Shiokawa, 1984a].

Pour la plupart des systèmes aéronautiques, la polarisation circulaire présente plus d'intérêt que la polarisation rectiligne. Dans le cas simplifié d'une réflexion sur la surface d'une Terre lisse (qui devrait être une bonne hypothèse pour des angles d'élévation (supérieurs à  $10^\circ$ ), les coefficients de diffusion copolaire et contrapolaire circulaires ( $\Gamma_c$  et  $\Gamma_x$ , respectivement) peuvent être exprimés en coefficients horizontal et vertical ( $\Gamma_h$  et  $\Gamma_v$ , respectivement) à l'aide de la formule

$$\Gamma_c = (\Gamma_h + \Gamma_v)/2 ; \Gamma_x = (\Gamma_h - \Gamma_v)/2 \quad (8.26)$$

dans le cas, soit d'une polarisation circulaire dextrogyre incidente, soit d'une polarisation circulaire lévogyre. Les coefficients horizontal et vertical ont en général des valeurs complexes. C'est pourquoi, il est nécessaire d'avoir des renseignements sur la phase pour pouvoir appliquer l'équation (8.26) aux courbes de la Figure 8.20.

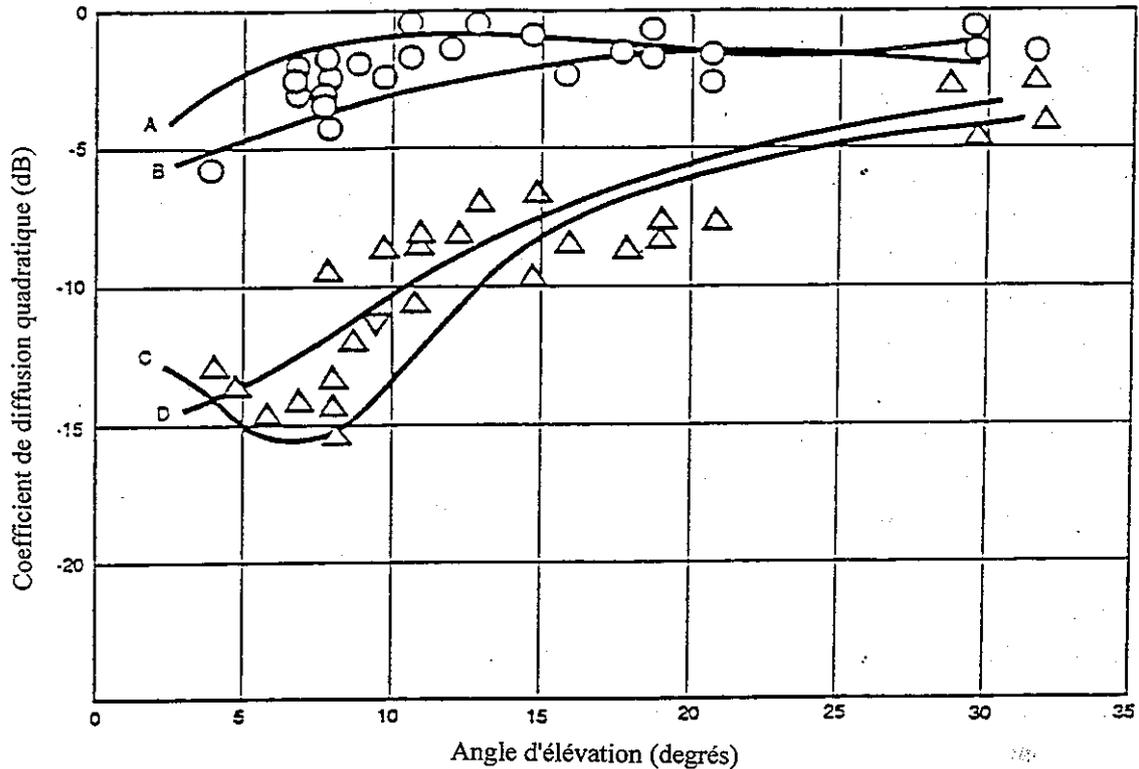


FIGURE 8.20

**Coefficients de diffusion quadratique moyens au-dessus de l'océan en fonction de l'angle d'élévation à 1,6 GHz**

- O: Mesures de la polarisation horizontale
- Δ: Mesures de la polarisation verticale
- A: Prévission de la polarisation horizontale, pente de 3°
- B: Prévission de la polarisation horizontale, pente de 12°
- C: Prévission de la polarisation verticale, pente de 3°
- D: Prévission de la polarisation verticale, pente de 12°

**8.3 Influence du milieu local**

Par influence du milieu local il faut entendre ici les contributions de bruit de différentes sources situées à proximité de la station de Terre et l'influence de la superstructure des navires lors de l'exploitation de terminaux du service mobile maritime. On trouvera au § 4 de la Recommandation UIT-R P.681 des modèles permettant de prévoir les conséquences de la propagation dues aux phénomènes locaux d'effet d'écran et d'occultation.

**8.3.1 Contribution de bruit du milieu local**

On trouvera ci-après une liste de quelques-unes des contributions de bruit du milieu local dans lequel la station terrienne est exploitée:

- *Bruit atmosphérique par absorption*

Des milieux absorbants comme l'oxygène, la vapeur d'eau et les particules de précipitations émettent un bruit thermique qui peut être assimilé à la température de bruit de l'antenne. Ces phénomènes sont examinés au § 4.

- *Bruit artificiel*

Les équipements électriques lourds ont tendance à générer un bruit large bande susceptible de brouiller des récepteurs sensibles. Un pourcentage important de ce bruit est un bruit impulsif large bande provenant des circuits d'allumage. Le bruit ambiant généré par les véhicules automobiles et les camions varie en fonction de la densité du trafic et donc de l'heure du jour. Ce bruit varie dans des proportions allant jusqu'à 20 dB selon qu'il est mesuré pendant un jour ouvrable ou pendant les week-end ou les vacances, périodes pendant lesquelles il est plus faible.

- *Émissions hors bande provenant de radars*

Les radars embarqués à bord de navires et les radars de surveillance fonctionnant en mode impulsions peuvent générer des émissions hors bande susceptibles de brouiller des récepteurs mobiles. Il est, en général, possible de supprimer ces émissions en insérant un guide d'ondes ou des filtres coaxiaux à la sortie de l'émetteur radar.

- *Brouillage causé par des émetteurs de communication très puissants*

Des émetteurs de Terre très puissants (par exemple radio HF, radiodiffusion télévisuelle) peuvent brouiller les stations terriennes du service mobile.

- *Brouillage causé par les véhicules automobiles*

Dans certaines conditions d'exploitation, les émissions RF générées par le trafic automobile peuvent altérer la sensibilité des récepteurs. Lors d'une mesure, le bruit enregistré pour un trafic très dense était d'environ -150 dB (mW/Hz) dans la bande de fréquences 1 535 - 1 660 MHz [Clarke et autres, 1974].

- *Bruit des chantiers navals*

Des amplitudes de bruit en crête extrêmement élevées de -141 dB (mW/Hz) ont été enregistrées au chantier naval de Boston qui fonctionnait alors à plein régime [Clarke et autres, 1974]. Ce bruit est une combinaison du bruit ambiant de la ville et du bruit électromagnétique large bande des équipements industriels.

### **8.3.2 Superstructure des navires/occultation**

La superstructure des navires peut être à l'origine de phénomènes de propagation par trajets multiples après réflexion et d'occultation en direction du satellite. On peut considérer que, dans la plupart des cas, les réflexions de la superstructure des navires sont cohérentes avec le signal direct. La profondeur des évanouissements dus à ces réflexions dépend d'un certain nombre de paramètres, notamment:

- la forme du navire;
- l'emplacement de l'antenne du navire;
- la directivité de l'antenne et le niveau des lobes latéraux ;
- le rapport axial et l'orientation de l'ellipse de polarisation;
- l'angle d'azimut et l'angle d'élévation en direction du satellite.

Le gain de l'antenne exerce une grande influence sur la profondeur d'évanouissement. Des antennes à faible gain, avec une ouverture de faisceau plus grande, capteront un nombre plus important des signaux réfléchis, d'où des évanouissements plus profonds.

Le phénomène d'occultation est dû aux superstructures des navires, par exemple les mâts et les divers types d'antennes déployées à bord des navires. La géométrie du phénomène d'occultation dû à un mât

est illustrée à la Figure 8.21. L'affaiblissement du signal dépend de plusieurs paramètres, notamment le diamètre de la colonne, la distance entre l'antenne et la colonne et les dimensions de l'antenne. La valeur estimée de l'affaiblissement dû au phénomène d'occultation par une structure de type colonne est indiquée à la Figure 8.22 pour des antennes présentant un gain de 20 dB et de 14 dB.

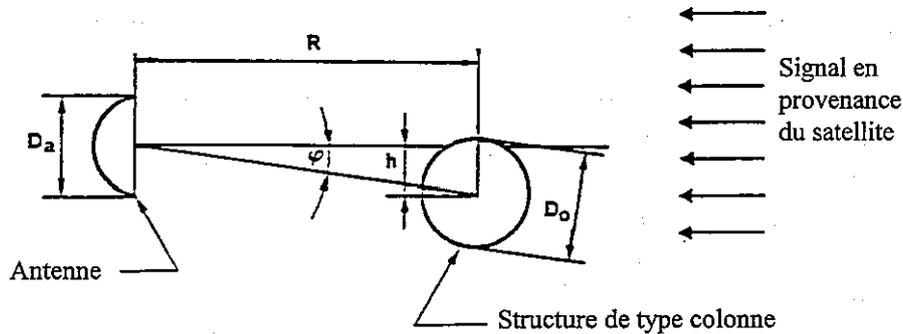


FIGURE 8.21

**Géométrie du phénomène d'occultation**

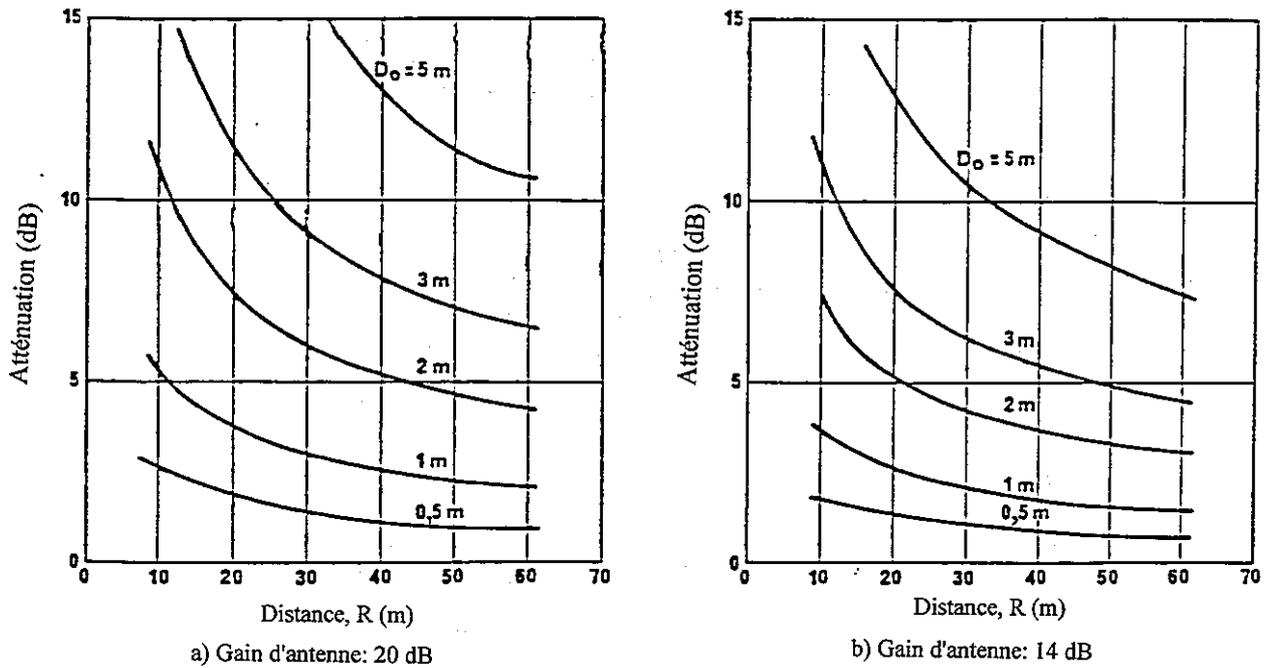


FIGURE 8.22

**Valeur estimée de l'affaiblissement dû au phénomène d'occultation**

**8.3.3 Mouvement des antennes mobiles**

Le mouvement des antennes mobiles est un paramètre important à prendre en considération dans la conception des systèmes de communication du service mobile maritime par satellite. Le niveau du signal reçu est influencé par le gain hors faisceau de l'antenne car le mouvement de l'antenne est lui-même influencé par le mouvement du navire. Les mouvements aléatoires du navire doivent être

compensés par un mécanisme de stabilisation adéquat afin de ne pas dérégler le pointage de l'antenne en direction du satellite. Pour ce faire, on utilise généralement une plate-forme à stabilisation passive par gravité ou un système de poursuite d'antenne actif. Dans un cas comme dans l'autre, l'erreur de pointage résiduelle de l'antenne peut être suffisamment importante pour qu'elle doive être prise en considération dans le calcul de la liaison.

Des données expérimentales [Sato et autres, 1984] donnent à penser que le mouvement de roulis d'un navire obéit sur le court terme à une distribution gaussienne à moyenne zéro. L'écart type de la distribution,  $\sigma_s$ , est fonction des caractéristiques du navire, de l'état de la mer et de la hauteur des vagues. La Figure 8.23 illustre la distribution de l'angle de roulis instantané d'un navire pour une mer calme ou agitée. La distribution du mouvement du navire suit approximativement une distribution gaussienne pour  $\sigma_s = 5,42$ . La figure illustre également la distribution de l'angle de roulis d'une antenne à stabilisation passive dans les mêmes conditions, distribution qui, elle aussi, suit une distribution gaussienne à moyenne zéro pour un écart type de 0,99. La relation entre l'écart type des deux distributions dépend de la conception du dispositif de stabilisation passive. Le mouvement de l'antenne est considérablement réduit selon l'ouverture de faisceau de l'antenne mais l'erreur de pointage résiduelle peut être suffisamment importante pour donner lieu à des fluctuations non négligeables du signal.

Sur de longues périodes de temps  $\sigma_s$  varie en fonction de l'état de la surface de la mer: une bonne approximation de sa distribution est donnée par une distribution log normale ou une distribution de Weibull [Nishinokubi et Kawashima, 1976].

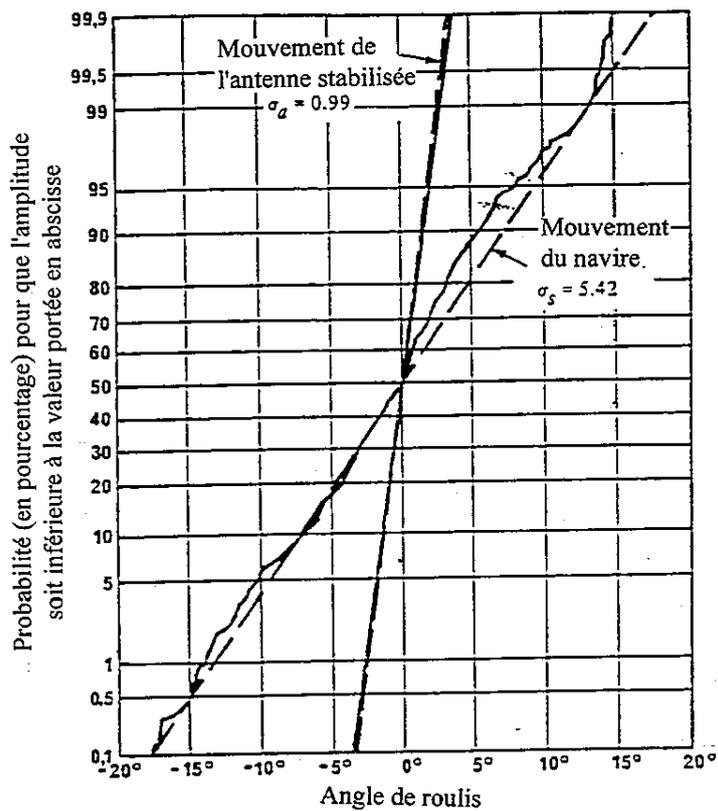


FIGURE 8.23

**Valeur mesurée du mouvement d'une antenne stabilisée**

- Valeurs mesurées
  - ..... Valeurs calculées
- Hauteur des vagues environ 5 m

## RÉFÉRENCES POUR LE CHAPITRE 8

- BEARD, C.I. [1961] Coherent and incoherent scattering of microwaves from the ocean. *IRE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-9, 5, 470-483.
- BECKMANN, P. et SPIZZICHINO, A. [1963] The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces. Pergamon Press, Nueva York/Oxford.
- BENZAIR, B., SMITH, H. et NORBURY, J.R. [1991] Tree attenuation measurements at 1 - 4 GHz for mobile radio systems, International Conference on Mobile Radio and Personal Communications, Coventry, 16-20.
- BOITHIAS, L. [1987] Radiowave Propagation. McGraw-Hill Book Co., New York, 1987.
- BUTTERWORTH, J.S. et MATT, E.E. [1983] The characterization of propagation effects for land-mobile satellite services. IEE Conf. Publ. No. 222 (Satellite systems for mobile communications and navigation), 51-54.
- BUTTERWORTH, J.S. [1984] Propagation measurements for land mobile satellite systems at 1 542 MHz. CRC Technical Note No. 723, Communications Research Centre, Ottawa, Canada.
- CLARKE, J.M., CANTOR, S.R., WINCHUS, J.J. et CAPORALE, A.L. [1974] Measurement and analysis of L-band (1535-1660 MHz) electromagnetic (EM) noise on ships. Final Report No. †CG-D-50-75, U.S. Dept. of Transportation, Washington, D.C.
- DAVARIAN, F. [1988] Irreducible error rate in aeronautical satellite channels. *Electron. Lett.*, Vol. 24, 21, 1332-1333.
- DeSANTO, J.A. [1981] Scattering from a rough interface. *Radio Sci.*, Vol. 16, 6, 1021-1024.
- DISSANAYAKE, A.W., JONGEJANS, A.W. et DAVIES, P.E. [1985] Preliminary results of PROSAT maritime-mobile propagation measurements. IEE Conf. Publ. No. 248, 338-342, *IEE Fourth Int. Conf. Antennas Propagat.*, Univ. Warwick, Coventry, Royaume-Uni.
- GOLDHIRSH, J. et VOGEL, W.J. [1987] Roadside tree attenuation measurements at UHF for land mobile satellite systems. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-35, 589-596.
- GOLDHIRSH, J. et VOGEL, W.J. [1992] *Propagation effects for Land Mobile Satellite Systems*. NASA Reference Publication 1274.
- HAGENAUER, J., NEUL, A., PAPKE, W., DOLAINSKY, F. et EDBAUER, F. [1987] The aeronautical satellite channel. DFVLR Tech. Rep. No. NE-NT-T-87-17, mai, DFVLR.
- HALL, M.P.M. [1979] *Effects of the Troposphere on Radio Communication*. IEE Electromagnetic Wave Series, 8, Peter Peregrinus Ltd., Londres, Royaume-Uni.
- IEEE Vehicular Technology Society Committee on Radio Propagation [1988] Coverage prediction for mobile radio systems operating in the 800/900 MHz frequency range. *IEEE Trans. Vehicular Tech.*, Vol. VT-37, 3-72.
- JONGEJANS, A. DISSANAYAKE, A., HART, N., HAUGLI, H., LOISY, C. et ROGARD, R. [1986] PROSAT Phase I Report, European Space Agency, STR-216.
- KARASAWA, Y., MATSUDO, T. et SHIOKAWA, T. [1990a] Wave height and frequency dependence of multipath fading due to sea reflection in maritime satellite communications. *Electron. Commun. Japan*, Part 1, Vol. 73,1, 95-106. (Translated from IEICE Vol. 72-BII, 4, 1989).

- KARASAWA, Y. et SHIOKAWA, T. [1984a] Characteristics of L-band multipath fading due to sea surface reflection. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-32, 6, 618-623.
- KARASAWA, Y. et SHIOKAWA, T. [1984b] Spectrum of L-band multipath fading due to sea surface reflection. *Trans. IECE of Japan*, Vol. J67-B, 2, 171-178.
- KARASAWA, Y. et SHIOKAWA, T. [1987] Fade duration statistics of L-band multipath fading due to sea surface reflection. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-35, 8, 956-966.
- KARASAWA, Y. et SHIOKAWA, T. [1988] A simple prediction method for L-band multipath fading in rough sea conditions. *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 36, 10, 1098-1104.
- KARASAWA, Y. et YASUNAGA, M. [1991] Interference evaluation method for mobile-satellite systems under Nakagami-Rice fading conditions. *Inst. Electro. Inform. Commun. Eng. Trans. Communications*, Vol. E75-B, 1, 42-49.
- KARASAWA, Y., YASUNAGA, M., SHIOKAWA, T. et YAMADA, M. [1990b] Propagation characteristics for aeronautical mobile-satellite systems. *13th AIAA Int. Commun. Sat. Sys. Conf.*, Los Angeles, 575-582, mars.
- KINSMAN, B. [1965] *Wind waves, their generation and propagation on the ocean surface*. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- KORN, I. [1989] Coherent detection of M-ary phase-shift keying in the satellite mobile channel. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. 37, 10, 997-1003.
- LONG, M.W. [1975] *Radar reflectivity of land and sea*. Lexington Books, Lexington, MA, États-Unis d'Amérique.
- MILLER, A.R., BROWN, R.M. et VEGH, E. [1984] New derivation for the rough-surface reflection coefficient and for the distribution of sea-wave elevations. *IEE Proc.*, Vol. 131, Part H, 2, 114-116.
- NISHINOKUBI, H. et KAWASHIMA, R. [1976] On the sea keeping qualities of fishing by field measurement - III. *J. Japan Inst. Nav.*, 55, 1-6.
- OHMORI, S., IRIMATA, A., MORIKAWA, H., KONDO, K., HASE, Y. et MIURA, S. [1985] Characteristics of sea reflection fading in maritime satellite communications. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. AP-33, 8, 838-845.
- PAPOULIS, A. [1965] *Probability, random variables and stochastic processes*, Sec. 14-4, McGraw-Hill, New York.
- SANDOWELL, D.T. et AGREEN, R.W. [1984] Seasonal variation in wind speed and sea state from global satellite measurements. *J. Geophys. Res.*, Vol. 89, no. C2, 2041-2052.
- SANDRIN, W. et FANG, D.J. [1986] Multipath fading characterization of L-band maritime mobile satellite links. *COMSAT Tech. Rev.*, Vol. 16, 2, 319-338.
- SATOH, K., NADAMAE, M. et MISHIMA, H. [1984] A simple ship-borne antenna stabilizer for limited area maritime satellite communication systems. 35th Cong. of the International Astronautical Federation (IAF), IAF 84-86.
- SCHROEDER, E.H. et autres [1976] Air traffic control experimentation and evaluation with the NASA ATS-6 satellite. The Boeing Company, Rep. No. FAA-RD-75-173.
- SIMMONS, A.J. [1981] EHF propagation through foliage, MIT Lincoln Laboratory TR-594.

- STARAS, H. [1968] Rough surface scattering on a communication link. *Radio Sci.*, Vol. 3, 6, 623-631.
- ULABY, F.T., WHITT, M.W. et DOBSON, M.C. [1990] Measuring the propagation properties of a forest canopy using a polarimetric scatterometer, *IEEE Trans. Antennas Propagat*, Vol. AP-38, 251-258.
- US DEPT of TRANSPORTATION [1973] ATS-5 multipath/ranging/digital data L-band experimental program - Phase V. Rep. No. FAA-RD-73-57-V.
- WALKER, E.H. [1983] Penetration of radio signals into buildings in the cellular radio environment, *BSTJ*, Vol. 62, 2719-2734.
- WEISSBERGER, M. et HAUBER, J. [1982] An initial critical summary of models for predicting the attenuation of radiowaves by trees. ESD-TR-81-101, Electromagnetic Compatibility Analysis Center, Annapolis, MD, juillet 1982.
- WELLS, P.I. [1977] The attenuation of UHF radio signals by houses, *IEEE Trans. Vehicular Tech*, Vol. VT-26, 358-362.
- YASUNAGA, M. KARASAWA, Y., SHIOKAWA, T. et YAMADA, M. [1986] Characteristics of L-band multipath fading due to sea surface reflection in aeronautical satellite communications. *Trans. IECE of Japan*, Vol. E69, 10, 1060-1063.
- YOSHIKAWA, M. et KAGOHARA, M. [1989] Propagation characteristics in land mobile satellite systems, 39th IEEE Vehicular Technology Conf, 550-556.

## CHAPITRE 9

### MODÉLISATION COMBINÉE DES EFFETS

Comme cela a été dit dans les sections précédentes, plusieurs phénomènes peuvent être à l'origine de la dégradation d'une liaison Terre-espace (voir le § 1.2). Il peut y avoir entre ces différentes causes de dégradation une corrélation ou une dépendance statistique plus ou moins grande.

L'affaiblissement par la pluie et par les nuages, entre autres, illustre la corrélation qui existe entre les effets de la propagation. Étant donné qu'il ne peut y avoir de précipitation sans présence d'un nuage, on peut dire que la probabilité d'affaiblissement par les nuages qui dépend de la présence de précipitation est un exemple; par contre, la probabilité de précipitation dépendant de la présence de nuage n'en est sûrement pas un (un nuage peut être ou non à l'origine de précipitations).

La modélisation combinée des effets est le processus qui consiste à représenter l'affaiblissement composite dû à toutes les composantes de l'atmosphère. Le résultat se présente sous forme d'une distribution des probabilités conjointes associées à l'affaiblissement total le long du trajet de propagation. Le processus tient compte de l'affaiblissement dû à chaque phénomène considéré comme une variable aléatoire. Les distributions de ces variables aléatoires sont ensuite combinées pour former une probabilité conjointe totale reposant sur des hypothèses de dépendance ou d'indépendance.

La première étape consiste à collecter des distributions de l'affaiblissement par la pluie, la vapeur d'eau, l'oxygène et les hydrosols (nuages). Selon les cas, on a aussi besoin d'une distribution de l'affaiblissement dû à la scintillation troposphérique (voir le § 6.2). On peut obtenir ces distributions en utilisant des modèles ou des mesures.

Les distributions sont en principe représentées par des fonctions de distribution cumulatives (FDC). Une FDC représente la probabilité pour qu'une variable aléatoire ne dépasse pas une valeur donnée. Il est possible de calculer la valeur de la FDC pour une variable aléatoire de valeur  $X$  en intégrant la fonction de densité de probabilité (FDP) de la variable aléatoire de  $-\infty$  à  $X$ . Toutes les opérations examinées pour les distributions de l'affaiblissement sont exécutées sur les FDC. Une fois collectées toutes les distributions de l'affaiblissement, on peut obtenir les estimations pour le cas le plus défavorable et le cas le plus favorable en supposant que les différents effets sont statistiquement dépendants ou indépendants.

#### 9.1 Somme équiprobable

Dans la première méthode, celle de la somme équiprobable, on suppose qu'il existe une dépendance totale entre les différents effets. La fonction de sommation équiprobable pour  $N$  effets uniques est donnée par la formule:

$$A_{TOTAL}(P) = A_1(P) + A_2(P) + \dots + A_N(P) \quad (9.1)$$

où  $A_X(P)$  est la valeur de l'affaiblissement de la FDC pour l'effet  $X$  pour un niveau de probabilité fixe de  $P$ . En effectuant la fonction de sommation équiprobable à tous les niveaux de probabilité, on obtient une distribution de l'affaiblissement total.

L'hypothèse fondamentale d'une dépendance statistique dans la méthode de sommation équiprobable signifie qu'il existe une parfaite corrélation entre toutes les causes de l'affaiblissement. En d'autres termes, si une des causes se renforce, elles se renforcent toutes. Il semble raisonnable de

penser que les taux de précipitation les plus élevés seront dus aux nuages les plus humides mais il se peut que l'inverse ne soit pas vrai. De même, par temps sec, on suppose que si la température et l'humidité restent constantes, la présence d'eau liquide dans les nuages présents le long du trajet reste elle aussi constante.

La méthode de la sommation équiprobable donne une prévision statistique de l'affaiblissement pour le "cas le plus défavorable", prévision qui donne la meilleure représentation des statistiques mesurées de l'affaiblissement pour les probabilités les plus élevées [Feldhake, 1996]. Toutefois, le niveau de probabilité auquel la sommation équiprobable commence à donner les résultats les plus précis dépend du système radioélectrique considéré et de paramètres géophysiques.

## 9.2 Convolution

La convolution est la deuxième méthode de combinaison des effets. Dans cette méthode, on suppose une indépendance statistique entre les différentes causes d'affaiblissement, ce qui permet de tenir compte de la nature aléatoire des niveaux des signaux due à la scintillation troposphérique pendant les périodes où la température et l'humidité sont fixes. Cette méthode tient aussi compte de l'influence des nuages qui passent, alors que d'autres facteurs d'affaiblissement sur le trajet restent constants. Toutefois, lorsqu'on utilise cette méthode, la probabilité pour qu'on observe des taux de précipitation extrêmes en l'absence de nuages est finie. La distribution de l'affaiblissement total est calculée à l'aide de la formule suivante:

$$P(A_{TOTAL}) = \int_{-\infty}^{A_{TOTAL}} P_1(A) \cdot P_2(A_{TOTAL} - A) dA \quad (9.2)$$

où  $P_1(A)$  est la densité de probabilité de l'affaiblissement de l'effet 1 et  $P_2(A)$  est la distribution de l'affaiblissement cumulative de l'effet 2. Lorsqu'on regroupe par convolution les distributions de l'affaiblissement dû à deux sources indépendantes, il faut veiller à ce que la résolution des distributions soit suffisante pour donner une résultante précise.

En supposant qu'il y a une indépendance statistique entre les différents effets, on suppose également que les variables aléatoires sont parfaitement décorrélées. Le résultat obtenu avec cette méthode représente la configuration la plus réaliste correspondant au "cas le plus favorable". On aurait une prévision plus optimiste du "cas le plus favorable" si l'on supposait qu'il existe une parfaite corrélation négative entre les différents effets. On peut observer ce type de loi de dépendance entre l'affaiblissement par l'air sec et l'affaiblissement par la vapeur d'eau pour les fréquences proches ou à l'intérieur des bandes de l'absorption d'oxygène [Salonen et autres, 1992]. Ceci est dû au fait que l'affaiblissement par l'air sec augmente lorsque la température de l'air diminue, de sorte que, la densité en vapeur d'eau diminuant elle aussi, l'affaiblissement par la vapeur d'eau est donc plus faible. A moins que cette condition particulière ne soit remplie, il convient d'utiliser la méthode de convolution pour prévoir la distribution correspondant au cas le plus favorable.

## 9.3 Segmentation temporelle

L'utilisation des méthodes de la sommation équiprobable et de la convolution pour combiner les effets permet d'obtenir une limite statistique supérieure et une limite statistique inférieure. Dans une configuration idéale, ces limites se confondent et l'on a une seule prévision. Dans la pratique, ce ne sera jamais le cas mais du fait de la segmentation temporelle des données les limites se rapprocheront [Feldhake, 1996].

La segmentation temporelle est le processus qui consiste à subdiviser les statistiques de l'affaiblissement en distributions représentant de plus petites unités de temps. Par exemple, ces distributions peuvent porter sur un mois, une saison ou sur une période avec/sans précipitation. Les limites supérieure et inférieure se rapprocheront d'autant plus que la séparation temporelle des données sera grande.

Une fois effectuée la segmentation temporelle des données, on obtient les limites supérieure et inférieure de l'affaiblissement pour chaque unité de temps en utilisant les techniques de la sommation équiprobable et de la convolution. On combine alors les limites inférieures pour obtenir une distribution de l'affaiblissement indépendante des cas, pour la totalité du temps. La même opération est effectuée pour les courbes dépendant des cas. Le processus permettant de calculer les distributions des limites supérieure et inférieure pour la totalité de la période de temps est le théorème de Bayes. Ce théorème stipule que, pour une valeur fixe de l'affaiblissement, la probabilité conjointe résultante peut être représentée par une moyenne pondérée.

$$P_{RESULTANTE}(A) = \frac{P_1(A)W_1 + P_2(A)W_2 + \dots + P_N(A)W_N}{\sum_{n=1}^N W_n} \quad (9.3)$$

où  $P_X(A)$  est la probabilité associée à la FDC de l'affaiblissement pour une période de temps  $X$  et une valeur de l'affaiblissement fixe de  $A$ . La valeur du facteur de pondération,  $W_X$ , est fonction de la quantité de temps prise en compte par la FDC de la période. Par exemple, si les FDC pour décembre, janvier et février étaient combinées pour créer une résultante pour l'hiver on aurait alors  $W_{DEC} = 31$ ,  $W_{JAN} = 31$  et  $W_{FEB} = 28,5$ .

#### 9.4 Racine carrée de la somme quadratique

On peut supposer que différentes combinaisons de dépendance ou d'indépendance statistique entre les différents effets permettent d'obtenir la meilleure estimation de l'affaiblissement combiné global [Poiars Baptista et Davies 1994; Watson et Hu 1994; Salonen et autres 1995; 1996]. La racine carrée de la somme quadratique (RSS) sur une base équiprobable donne un résultat qui se situe entre les limites statistiques supérieure et inférieure. Elle est examinée dans la Recommandation UIT-R P.618 pour combiner les effets de la scintillation et l'affaiblissement dû à la pluie [Karasawa et Matsudo, 1991]. Elle peut s'exprimer sous la forme suivante:

$$A_{TOTAL} = \sqrt{A_1^2(P) + A_2^2(P)} \quad (9.4)$$

#### 9.5 Exemple

Dans cet exemple, on compare deux méthodes de combinaison des distributions de la scintillation et de l'affaiblissement, en utilisant des mesures effectuées avec une radiobalise avec filtre ou sans filtre, à 11,2 GHz, à Austin (Texas) pour un angle d'élévation du trajet de 5,8°. La Figure 9.1 illustre les distributions cumulatives de l'affaiblissement total (courbe en trait plein), de l'affaiblissement par absorption uniquement (courbe en pointillés - affaiblissement par la pluie, les gaz atmosphériques et les nuages) et de l'affaiblissement par scintillation (courbe tiret-point). Les distributions de l'affaiblissement total obtenues à partir des distributions de l'affaiblissement par scintillation et par absorption à l'aide des méthodes de la convolution et de la racine carrée de la somme quadratique sont également indiquées. La distribution cumulative obtenue avec la méthode de la convolution diffère quelque peu de la distribution de l'affaiblissement total mesuré; la méthode utilisant la racine carrée de la somme quadratique sous-estime l'influence de la scintillation dans le cas de faibles marges de protection contre les évanouissements.

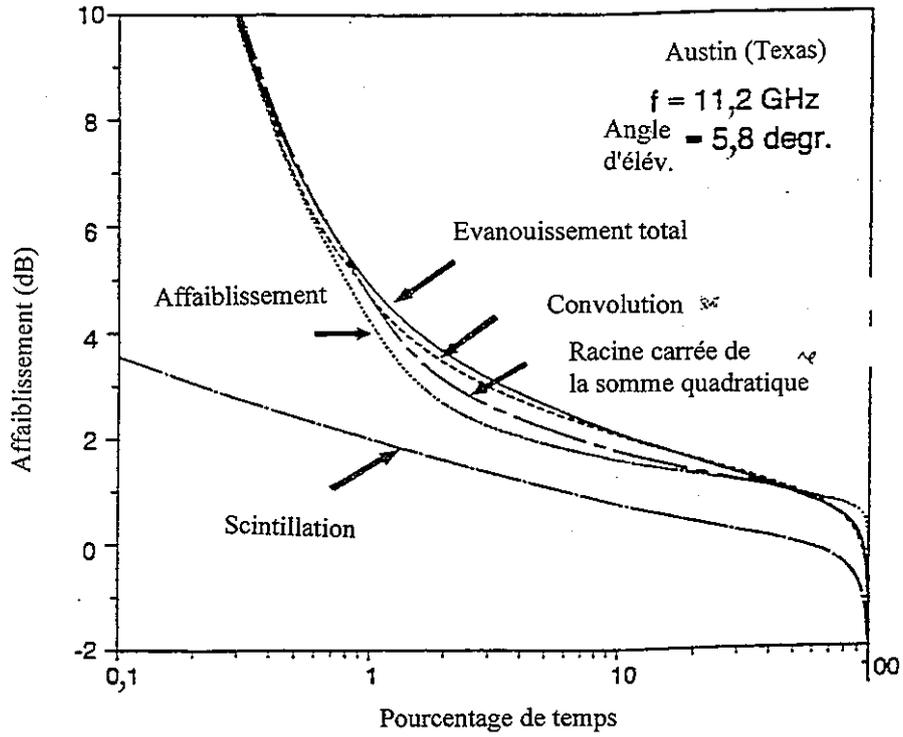


FIGURE 9.1

Distributions cumulatives à 11,2 GHz pour un angle d'élévation de  $5,8^\circ$   
à Austin (Texas) de juin 1988 à mai 1992

RÉFÉRENCES POUR LE CHAPITRE 9

FELDHAKE, G.S., [1996] A sensitivity analysis of combined effects modelling, NAPEX XX, Fairbanks, Alaska.

KARASAWA, Y. et MATSUDO, T. [1991] Characteristics of fading on low-elevation angle Earth-space paths with concurrent rain attenuation and scintillation, *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, Vol. AP-39, 5, 657-661.

POIARES BAPTISTA, J.P.V. et DAVIES, P.G. (Éditeurs), [1994] *OPEX, Volume 1: Reference Book on Attenuation Measurement and Prediction*, European Space Agency, WPP-083, Noordwijk, Pays-Bas.

SALONEN, E., KARHU, S., JOKELA, P., ZHANG, W., UPPALA, S., AULAMO, H., SARKKULA, S. et POIARES BAPTISTA, J.P.V., [1992] Modelling and calculation of atmospheric attenuation for low-fade-margin satellite communications, *ESA Journal*, Vol. 16, 3, 615-622.

SALONEN, E., KARHU, S., TERVONEN, J., [1995] Prediction of total atmospheric attenuation for low-fade margin satellite communications, 7th URSI Commission F Open Symposium, Ahmedabad, Inde.

SALONEN, E., TERVONEN, J., VOGEL, W., [1996] Scintillation effects on total fade distributions for Earth-satellite links, *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, Vol. AP-44, 1, 23.

WATSON, P.A. et HU, Y.F., [1994] Prediction of attenuation on satellite-Earth links for systems operating with low fade margins, CLIMPARA '94, URSI Commission F, Moscou, Russie.





**\*7321\***

Imprimé en Suisse  
Genève. 1996  
ISBN 92-61-06362-4