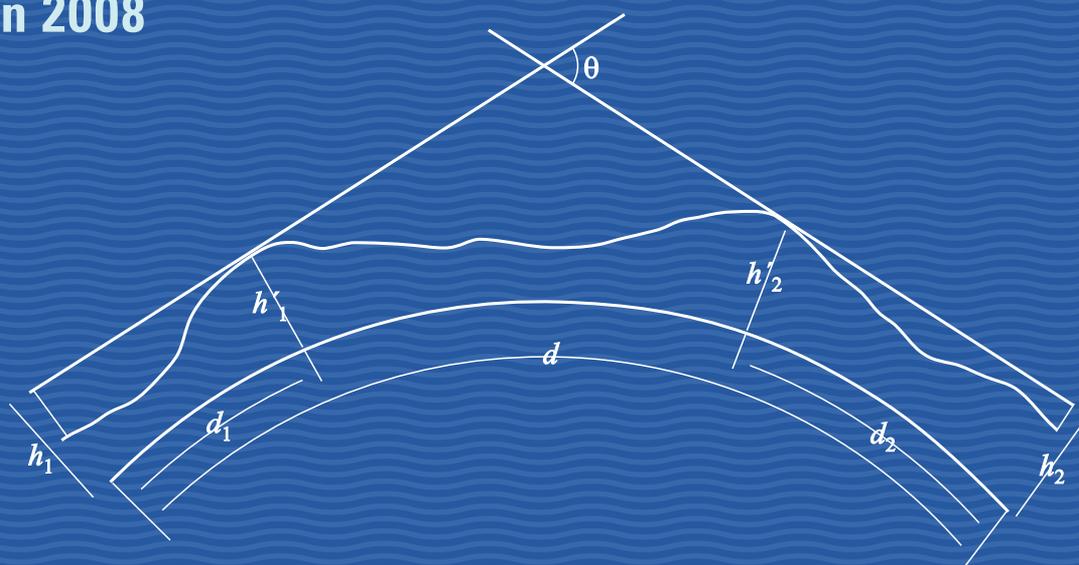


Manuel

INFORMATIONS SUR LA PROPAGATION DES ONDES RADIOÉLECTRIQUES POUR LA CONCEPTION DES LIAISONS DE TERRE POINT À POINT

Edition 2008



SECTEUR DES RADIOCOMMUNICATIONS DE L'UIT

Le rôle du Secteur des radiocommunications est d'assurer l'utilisation rationnelle, équitable, efficace et économique du spectre radioélectrique par tous les services de radiocommunication, y compris les services par satellite, et de procéder à des études pour toutes les gammes de fréquences, à partir desquelles les Recommandations seront élaborées et adoptées.

Les fonctions réglementaires et politiques du Secteur des radiocommunications sont remplies par les Conférences mondiales et régionales des radiocommunications et par les Assemblées des radiocommunications assistées par les Commissions d'études.

Pour tout renseignement sur les questions de radiocommunication

Veillez contacter:

UIT
Bureau des radiocommunications
Place des Nations
CH-1211 Genève 20
Suisse

Téléphone:	+41 22 730 5800
Téléfax:	+41 22 730 5785
E-mail:	brmail@itu.int
Web:	www.itu.int/itu-r

Pour commander les publications de l'UIT

Les commandes ne sont pas acceptées par téléphone. Veillez les envoyer par télécopie ou par courrier électronique (e-mail).

UIT
Division des ventes et du marketing
Place des Nations
CH-1211 Genève 20
Suisse

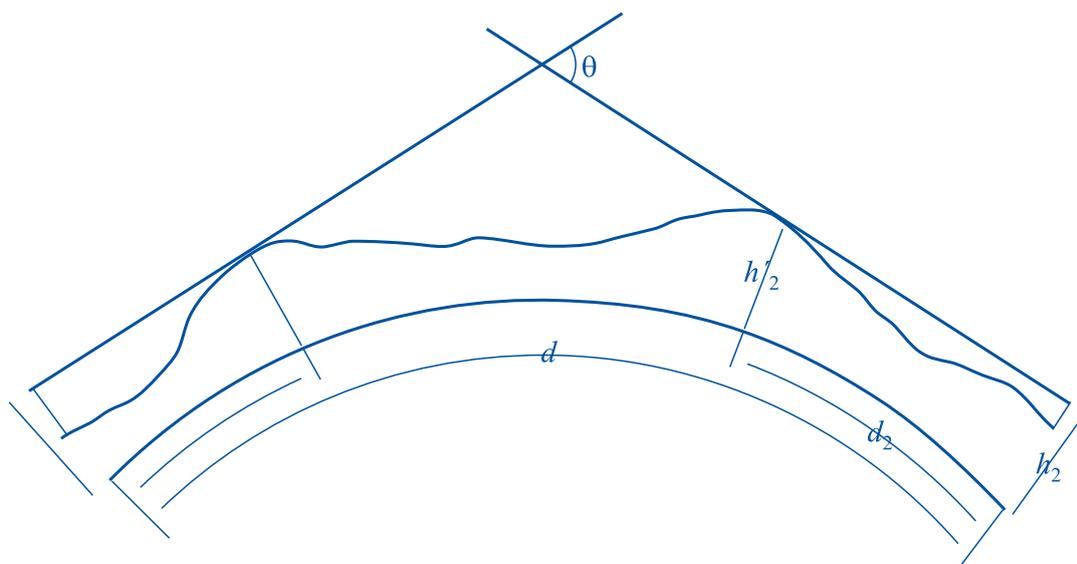
Télécopie:	+41 22 730 5194
E-mail:	sales@itu.int

La Librairie électronique de l'UIT: www.itu.int/publications

Manuel

Informations sur la propagation des ondes radioélectriques pour la conception des liaisons de Terre point à point

Edition 2008



AVANT-PROPOS

Les liaisons radioélectriques de Terre constituent un élément essentiel de l'infrastructure de télécommunications de la plupart des pays dans le monde. Pour garantir la qualité de fonctionnement du réseau et des services afférents, mais aussi exploiter le spectre électromagnétique le plus efficacement possible et donc, avantage capital, réduire les coûts, il est primordial de dimensionner correctement les systèmes au regard des effets de la propagation des ondes radioélectriques.

Le présent Manuel contient des informations de base, des références scientifiques et des éléments d'orientation sur les effets de la propagation des ondes radioélectriques en ce qui concerne les liaisons en visibilité directe, les liaisons par diffusion troposphérique et transhorizon, et les liaisons optiques en espace libre. Il a été conçu en vue d'une utilisation conjointe avec les Recommandations tenues à jour par la Commission d'études 3 des radiocommunications, et ce afin de faciliter la conception des liaisons de Terre point à point.

Bertram Arbesser-Rastburg
Président, Commission d'études 3
des radiocommunications

TABLE DES MATIÈRES

	<i>Page</i>
AVANT-PROPOS.....	iii
INTRODUCTION	1
REMERCIEMENTS.....	3
PARTIE 1 – LIAISONS EN VISIBILITÉ DIRECTE	5
1 INTRODUCTION.....	5
2 APPLICATIONS CLASSIQUES	5
3 EFFETS DE PROPAGATION ÉLÉMENTAIRES	6
3.1 Affaiblissement en espace libre	6
3.2 Affaiblissement dû aux gaz de l'atmosphère.....	7
3.3 Évanouissements dus à la diffraction et dégagement du trajet	7
3.3.1 Principe de la méthode de prévision de l'affaiblissement dû à la diffraction.....	7
3.3.2 Principe des procédures permettant de déterminer le dégagement du trajet.....	8
3.4 Évanouissements par scintillation.....	9
3.5 Résumé des mécanismes de propagation associés aux évanouissements par trajets multiples	10
4 AFFAIBLISSEMENT DÛ AUX PRÉCIPITATIONS ET AUTRES PARTICULES ATMOSPHÉRIQUES.....	10
4.1 Affaiblissement dû aux précipitations	10
4.1.1 Principe de la méthode de prévision de l'affaiblissement dû aux précipitations.....	11
4.1.2 Affaiblissement linéique	12
4.1.3 Longueur de trajet équivalente	12
4.1.4 Exemples d'application	13
4.1.5 Prévision de l'affaiblissement combiné dû à la pluie et à la neige mouillée.....	13
4.1.6 Similitudes à long terme en polarisation et en fréquence pour les statistiques de l'affaiblissement dû à la pluie	17
4.1.7 Statistiques de durée et de fréquence des évanouissements dû aux précipitations ...	18
4.1.8 Variations saisonnières – mois le plus défavorable	19
4.1.9 Étude de l'évaluation du modèle (validation)	19
4.1.10 Exemple de calcul.....	19
4.2 Liaisons en cascade et liaisons convergentes.....	21
4.2.1 Évanouissements corrélés sur des trajets en cascade.....	21
4.2.2 Trajets convergents.....	22
4.3 Trajets avec répéteurs passifs	22

	<i>Page</i>
5	ÉVANOUISSEMENTS PAR TRAJETS MULTIPLES À UNE SEULE FRÉQUENCE 23
5.1	Prévision de la distribution des évanouissements et du renforcement 23
5.1.1	Principe et précision des méthodes 1 et 2 23
5.1.2	Principe et précision de la méthode de détermination des évanouissements peu profonds 27
5.1.3	Principe et précision de la méthode utilisée pour la zone de renforcement 28
5.1.4	Exemples d'application 28
5.2	Statistiques sur le nombre et la durée des évanouissements 29
5.2.1	Procédures d'estimation 30
5.2.2	Principe expérimental des procédures d'estimation 30
5.3	Vitesse de variation du niveau du signal 31
5.4	Trajets courts 31
5.5	Courtes périodes de temps 31
5.6	Liaisons en cascade 32
6	DISTORSION DUE AUX EFFETS DE LA PROPAGATION 33
6.1	Modèles de propagation par trajets multiples 33
6.1.1	Modèles fictifs de rayons 34
6.1.2	Modèles polynômiaux 34
6.1.3	Modèles paramétriques 34
6.2	Calcul de la qualité de fonctionnement 34
6.2.1	Méthodes des courbes de signature 35
6.2.2	Méthodes de la marge de protection contre les évanouissements 37
6.2.3	Méthodes utilisant des statistiques de dispersion d'amplitude linéaire (LAD) 38
7	DÉGRADATION DE LA DISCRIMINATION DE POLARISATION CROISÉE 39
7.1	Modèle de canal 40
7.1.1	Champ reçu nominal 42
7.1.2	XPI dû à la propagation (raisonnement à un rayon) 42
7.1.3	XPI dû à la propagation par trajets multiples (2 rayons) 44
7.1.4	Dépendance par rapport à l'affaiblissement copolaire 45
7.2	Prévision des statistiques de la XPD par temps clair 45
7.2.1	Description de la méthode Q 46
7.2.2	Exemples d'application 47
7.3	Prévision des statistiques de XPD dans des conditions de précipitations 48
7.3.1	Principe des méthodes de prévision de la XPD dans des conditions de précipitations 48
7.3.2	Exemples d'application 49
7.4	Effets relatifs de la dégradation de la XPD par temps clair et par temps de pluie 50
7.5	Transpolarisation due aux tempêtes de sable et de poussière 50

8	TECHNIQUES D'ATTÉNUATION DES EFFETS DE LA PROPAGATION PAR TRAJETS MULTIPLES	50
8.1	Stratégies et techniques ne faisant pas appel à la diversité	51
8.1.1	Augmentation de l'inclinaison du trajet	51
8.1.2	Réduction de l'incidence des réflexions de surface.....	52
8.1.3	Réduction du dégagement du trajet	54
8.2	Techniques avec diversité.....	54
8.2.1	Diversité d'espace	55
8.2.2	Espacement des antennes dans les systèmes à diversité d'espace.....	55
8.2.3	Espacement angulaire en diversité d'angle et systèmes combinant diversité d'espace et diversité angulaire	55
8.2.4	Amélioration de la diversité d'espace dans les systèmes à bande étroite.....	57
8.2.5	Diversité de fréquence	57
8.2.6	Facteur d'amélioration de diversité de polarisation pour les systèmes à large bande	60
8.2.7	Avantages relatifs des différentes techniques faisant appel à la diversité et de leurs combinaisons	60
8.3	Techniques de diversité visant à atténuer les diminutions de la XPD	61
	RÉFÉRENCES	61
	PARTIE 2 – LIAISONS TRANSHORIZON	69
1	INTRODUCTION.....	69
2	APPLICATIONS CLASSIQUES	69
3	BASE THÉORIQUE.....	69
3.1	Diffraction.....	70
3.1.1	Diffraction sur une Terre sphérique lisse.....	70
3.1.2	Diffraction par des obstacles isolés	71
3.1.3	Diffraction par des obstacles multiples.....	71
3.1.4	Diffraction par un terrain irrégulier	71
3.2	Diffusion troposphérique	72
4	PRÉVISION DE L'AFFAIBLISSEMENT DE TRANSMISSION.....	75
4.1	Affaiblissement par diffraction.....	76
4.1.1	Diffraction au-dessus d'une Terre sphérique	76
4.1.2	Diffraction par une arête en lame de couteau	76
4.1.3	Obstacle unique de sommet arrondi.....	77
4.1.4	Cas à deux arêtes en lame de couteau.....	77
4.1.5	Plusieurs obstacles isolés.....	77
4.1.6	Exemples d'application	78

	<i>Page</i>
4.2	Affaiblissement de transmission par diffusion troposphérique 83
4.2.1	Gain d'antenne pour le trajet 83
4.2.2	Exemple d'application..... 84
4.2.3	Résultats des essais 86
4.2.4	Affaiblissement combiné et sa variabilité..... 87
5	DISTORSION DUE AUX EFFETS DE LA PROPAGATION 89
6	TECHNIQUES AVEC DIVERSITÉ 90
6.1	Diversité d'espace 90
6.2	Diversité de fréquence 91
6.3	Diversité angulaire..... 91
6.4	Diversité de polarisation 92
6.5	Diversité dans le temps 92
6.6	Combinaison de techniques 92
6.7	Gain de diversité 92
	RÉFÉRENCES 95
	PARTIE 3 – LIAISONS OPTIQUES EN ESPACE LIBRE 99
1	INTRODUCTION..... 99
2	ÉTUDES PRÉALABLES À LA CONCEPTION D'UNE LIAISON FSO..... 99
3	AFFAIBLISSEMENT GÉOMÉTRIQUE..... 100
4	AFFAIBLISSEMENT ATMOSPHÉRIQUE DÛ À L'ABSORPTION ET À LA DIFFUSION..... 100
4.1	Affaiblissement par temps clair 101
4.2	Affaiblissement supplémentaire 102
4.2.1	Diffusion de Mie (estimation de l'affaiblissement par le brouillard)..... 103
4.2.2	Affaiblissement dû à la pluie 104
4.2.3	Affaiblissement dû à la neige..... 105
5	EFFETS DE SCINTILLATION 106
6	AFFAIBLISSEMENT DÛ À LA LUMIÈRE AMBIANTE 108
7	OBSERVATIONS DIVERSES 109
8	EXEMPLE D'APPLICATION..... 109
	RÉFÉRENCES 111

INTRODUCTION

Le présent Manuel de l'UIT-R, intitulé *Informations sur la propagation des ondes radioélectriques pour la conception des liaisons de Terre point à point*, contient des informations de base et des renseignements complémentaires sur la propagation des ondes radioélectriques. Il va de pair avec les Recommandations de l'UIT-R qui ont été élaborées par la Commission d'études 3 des radiocommunications pour faciliter la conception des systèmes de communication de Terre. Les Recommandations pertinentes de l'UIT-R énumérées ci-dessous contiennent des méthodes de prévision des dégradations ainsi que des conseils techniques sur la propagation des ondes radioélectriques pour les faisceaux hertziens à visibilité directe (LoS) de Terre et les faisceaux hertziens transhorizon.

Ce Manuel, d'une série de six Manuels élaborés par la Commission d'études 3 des radiocommunications, a été conçu en vue d'une utilisation conjointe avec les Recommandations UIT-R publiées de la série P. Il vise à aider l'utilisateur à mettre en œuvre ces Recommandations. Ci-dessous figurent les autres Manuels UIT-R de la Commission d'études 3. Ils concernent la propagation au-dessus de la surface de la Terre, la radiométéorologie, les systèmes Terre-espace et les services mobiles terrestres:

- Courbes de propagation des ondes radioélectriques au-dessus de la surface de la Terre;
- Radiométéorologie;
- Données de propagation des ondes radioélectriques pour la prévision des communications sur les trajets Terre-Espace;
- L'ionosphère et ses effets sur la propagation des ondes radioélectriques;
- Propagation des ondes radioélectriques dans le service mobile terrestre de Terre, dans les bandes d'ondes métriques et décimétriques.

Il est conseillé aux utilisateurs des Recommandations UIT-R de consulter le Manuel correspondant à leurs besoins spécifiques.

Le Manuel sur les liaisons de Terre point à point a été conçu pour aller de pair avec les Recommandations UIT-R de la série P pour les faisceaux à visibilité directe, les faisceaux hertziens transhorizon et les systèmes optiques en espace libre. Les Recommandations UIT-R essentielles mentionnées dans le présent Manuel sont:

Recommandation UIT-R P.530-12: Données de propagation et méthodes de prévision nécessaires pour la conception de faisceaux hertziens à visibilité directe de Terre;

Recommandation UIT-R P.617-1: Techniques de prévision de la propagation et données de propagation nécessaires pour la conception des faisceaux hertziens transhorizon.

Le présent Manuel UIT-R, qui accompagne les Recommandations susmentionnées, utilise la même terminologie, les mêmes notations, les mêmes numéros d'équations, etc. La duplication des données de propagation figurant dans ces Recommandations a été intentionnellement réduite au minimum et les méthodes de prévision elles-mêmes se trouvent dans les Recommandations. Bien entendu, en ce qui concerne tous les calculs des systèmes, il est conseillé d'utiliser la dernière version des Recommandations.

La mise en œuvre correcte des Recommandations UIT-R pour les systèmes de Terre nécessite des données radiométéorologiques et autres provenant de Recommandations UIT-R complémentaires. Ci-dessous figurent celles qui sont mentionnées dans le présent Manuel:

Recommandation UIT-R P.310-9: Définitions des termes relatifs à la propagation dans les milieux non ionisés;

Recommandation UIT-R P.311-12: Acquisition, présentation et analyse des données dans les études relatives à la propagation troposphérique;

Recommandation UIT-R P.525-2: Calcul de la propagation en espace libre;

Recommandation UIT-R P.526-10: Propagation par diffraction;

2 *Informations sur la propagation des ondes radioélectriques pour la conception des liaisons de Terre point à point*

- Recommandation UIT-R P.453-9: Indice de réfraction radioélectrique: formules et données de réfractivité;
- Recommandation UIT-R P.676-7: Affaiblissement dû aux gaz de l'atmosphère;
- Recommandation UIT-R P.834-6: Effets de la réfraction troposphérique sur la propagation des ondes radioélectriques;
- Recommandation UIT-R P.837-5: Caractéristiques des précipitations pour la modélisation de la propagation;
- Recommandation UIT-R P.310-9: Définitions des termes relatifs à la propagation dans les milieux non ionisés;
- Recommandation UIT-R P.838-3: Modèle d'affaiblissement linéique dû à la pluie destiné aux méthodes de prévision;
- Recommandation UIT-R P.1814: Méthodes de prévision nécessaires pour la conception de liaisons optiques de Terre en espace libre.

REMERCIEMENTS

Le présent Manuel a été compilé par le Groupe de travail 3M de l'UIT-R à partir de contributions et de documents en accès libre, en particulier le rapport final du projet COST 235. Parmi les personnes ayant contribué au Manuel, nous remercions

ARAPOGLOU, Pantelis-Daniel

ASSIS, Mauro

MIRANDA, Erasmus Couto Brazil de

OLSEN, Roderic L.

ORDANO, Luciano

SATO, Akio

SILVA MELLO, Luiz A.R. da

SIZUN, Herve

TANEM, Torbjørn

TJELTA, Terje

VENTOURAS, Spiridon

ZAFFARONI, Maurizio

ZHANG, Minggao.

Rédacteur du Manuel: Luiz A.R. da Silva Mello et Terje Tjelta.

Rédacteur de la Partie 1 – Liaisons en visibilité directe: Roderic L. Olsen.

Rédacteur de la Partie 2 – Liaisons transhorizon: Mauro Assis.

Rédacteur de la Partie 3 – Liaisons optiques en espace libre: Spiridon Ventouras.

PARTIE 1

LIAISONS EN VISIBILITÉ DIRECTE

1 Introduction

Cette partie du Manuel de l'UIT-R donne des indications sur les phénomènes de propagation qui ont une incidence sur la conception et le fonctionnement des faisceaux hertziens en visibilité directe. Pour de plus amples informations sur les aspects système, notamment les principes, la conception et le fonctionnement des faisceaux hertziens en visibilité directe, il convient de se reporter au Manuel UIT-R *Faisceaux hertziens numériques*.

La première partie fait un rapide tour d'horizon des applications classiques de ces faisceaux hertziens. Les sections suivantes fournissent des informations de base sur les différentes méthodes de prévision concernant les liaisons en visibilité directe (LoS), telles qu'elles figurent dans la Recommandation associée UIT-R P.530. Comme dans cette Recommandation, l'information est organisée en fonction des effets de propagation à prendre en considération.

De plus, le Manuel présente certaines méthodes de prévision, autres que celles indiquées dans la Recommandation UIT-R P.530, permettant de prévoir les évanouissements par trajets multiples à une seule fréquence ainsi que la distorsion due aux effets de la propagation.

2 Applications classiques

Les faisceaux hertziens en visibilité directe, qui existent depuis plusieurs dizaines d'années, sont utilisés pour la transmission sur le réseau de télécommunications et pour la distribution dans les systèmes de radiodiffusion. Les premiers faisceaux hertziens étaient analogiques, la porteuse étant modulée en fréquence. Les premiers faisceaux hertziens numériques dans la hiérarchie numérique plésiochrone (PDH), introduits vers 1970, présentaient des débits binaires de 1,5 Mbit/s à 140 Mbit/s. Dans la hiérarchie numérique synchrone (SDH), les faisceaux hertziens numériques en visibilité directe peuvent être intégrés au réseau, avec les fibres optiques et d'autres équipements de transmission. Leur capacité est comprise entre 52 Mbit/s et 622 Mbit/s sur chaque voie radioélectrique. À noter la mise en place, ces dernières années, de faisceaux hertziens numériques affichant une capacité en Gbit/s.

Les faisceaux hertziens numériques en visibilité directe peuvent fonctionner dans la gamme de fréquences comprise entre 1 GHz et 90 GHz environ. Les Recommandations UIT-R se rapportant à la Commission d'études 5 des radiocommunications fournissent les fréquences spécifiques et les largeurs de bande des canaux pour différents faisceaux hertziens.

Parce qu'elles présentent une grande largeur de bande, les transmissions numériques ont modifié les conditions de propagation qui déterminent la réponse à plusieurs problèmes: évanouissement du signal, affaiblissement dû à la pluie, diffraction. La distorsion due à la dépendance de l'amplitude et du temps de propagation de groupe par rapport à la fréquence augmente nettement dans des conditions de trajets multiples par temps clair. Pour atténuer les effets de la distorsion et des évanouissements par trajets multiples, on peut employer des égaliseurs adaptatifs et différents types de techniques mettant en jeu la diversité, notamment la diversité de fréquence, la diversité d'espace, la diversité angulaire et la diversité de polarisation.

Du fait des affaiblissements de propagation et des restrictions de puissance de l'émetteur et de gain des antennes, la longueur de trajet utilisable est limitée. La longueur de trajet maximale pour les fréquences élevées (> 10 GHz environ) dépend principalement de la pluie (cette dépendance augmentant avec la fréquence), mais elle dépend également du profil de trajet et des objectifs de qualité de fonctionnement. Pour les fréquences inférieures (< 10 GHz environ), les effets de la pluie sont moins importants que la distorsion du signal due aux évanouissements par trajets multiples. Ainsi, pour des fréquences inférieures à 11 GHz, la

longueur de trajet classique est d'environ 40 à 60 km; pour des fréquences comprises entre 13 et 15 GHz, environ 20 à 30 km; et pour 18 GHz, environ 15 km. À noter cependant que les variations locales peuvent être relativement importantes.

En règle générale, l'émission se fait selon une seule polarisation linéaire, horizontale ou verticale. Pour accroître la capacité des canaux (622 Mbit/s ou plus par exemple) sans augmenter la largeur de bande, on peut recourir indépendamment à la polarisation orthogonale pour l'émission sur le même canal de fréquence et le même trajet. Il convient cependant d'utiliser dans ce cas des annuleurs de brouillages de transpolarisation (XPIC) afin de diminuer l'effet de brouillages dans le même canal.

Les principales applications des futurs faisceaux hertziens numériques en visibilité directe sont les systèmes de transport point à point à capacité élevée et les réseaux métropolitains à large bande utilisant l'accès hertzien. Ces applications, ainsi que d'autres déjà en œuvre, tirent profit de la fiabilité, de la capacité et de la rapidité des faisceaux hertziens numériques, dont le coût et la durée de mise sur le marché sont de plus en plus faibles.

3 Effets de propagation élémentaires

Les mécanismes de propagation à prendre en compte lors de la conception des liaisons de Terre en visibilité directe se divisent en deux catégories en fonction de la présence ou de l'absence d'effets sur l'interruption de transmission, du moins en ce qui concerne les applications classiques examinées au § 2. Les évanouissements par trajets multiples sont le principal mécanisme d'interruption pour les fréquences inférieures à 10 GHz environ sur des liaisons de plus de à quelques kilomètres. L'affaiblissement dû aux précipitations est le principal mécanisme d'interruption pour les fréquences supérieures à 10 GHz. Du fait de leur importance, les méthodes permettant de prévoir les statistiques d'évanouissement et d'affaiblissement dus à ces mécanismes ainsi que les techniques d'atténuation de ces effets sont présentées séparément dans les sections suivantes.

Le principal objet du présent chapitre est d'examiner les autres effets essentiels de propagation à prendre en compte lors de la conception des systèmes, qui n'ont pas d'incidence majeure sur les interruptions de transmission. Il s'agit de l'affaiblissement en espace libre, de l'affaiblissement dû à l'absorption de l'atmosphère, de l'affaiblissement dû à la diffraction, de l'affaiblissement dû au découplage d'antenne et des évanouissements par scintillation, qui sont examinés dans les § 3.1 à 3.5. Étant donné que les phénomènes associés aux évanouissements par trajets multiples jouent un rôle dans plusieurs sections traitant des effets et de l'atténuation de ces évanouissements, ils sont brièvement résumés au § 3.6. Le Manuel UIT-R *Radiométéorologie* de la Commission d'études 3 fournit de plus amples informations sur les phénomènes physiques associés à tous ces effets de propagation.

3.1 Affaiblissement en espace libre

L'affaiblissement en espace libre est principalement dû à la seule divergence du faisceau, laquelle correspond à l'étalement de l'énergie du signal sur des zones qui s'élargissent à mesure que la distance par rapport à la source augmente. On peut le définir comme l'affaiblissement du signal qui serait observable si tous les effets d'absorption, de diffraction, d'obstruction, de réfraction, de diffusion et de réflexion étaient suffisamment contenus pour qu'ils n'aient pas d'incidence sur la propagation. La Recommandation UIT-R P.525 fournit l'équation permettant de calculer l'affaiblissement en espace libre:

$$L_{bf} = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad (1)$$

où:

L_{bf} : affaiblissement en espace libre

d : longueur du trajet

λ : longueur d'onde dans la même unité que d .

L'équation exprimée en dB et utilisant la fréquence au lieu de la longueur d'onde donne:

$$L_{bf} \text{ (dB)} = 32,4 + 20 \log f + 20 \log d \quad (2)$$

où:

L_{bf} : affaiblissement de transmission de référence en espace libre (dB)

d : longueur du trajet (km)

f : fréquence (MHz).

3.2 Affaiblissement dû aux gaz de l'atmosphère

Il existe toujours un certain affaiblissement dû à l'absorption par l'oxygène et par la vapeur d'eau, dont on doit tenir compte dans le calcul de l'affaiblissement de propagation total aux fréquences supérieures à 10 GHz environ. L'affaiblissement le long d'un trajet de longueur d (km) est:

$$A_a = \gamma_a d \quad \text{dB} \quad (3)$$

L'affaiblissement linéique γ_a (dB/km) se calcule conformément à la Recommandation UIT-R P.676.

NOTE 1 – Pour des trajets de longueur supérieure à 10 km aux fréquences supérieures à 20 GHz environ, il peut être nécessaire de connaître les statistiques de la concentration en vapeur d'eau et de la température au voisinage du trajet. La Recommandation UIT R P.836 fournit des informations sur la concentration en vapeur d'eau.

3.3 Évanouissements dus à la diffraction et dégagement du trajet

Des diminutions du gradient vertical du coïndice de réfraction de l'atmosphère le long du trajet suffisamment en-dessous de la valeur médiane d'environ -40 unités N/km peuvent provoquer une courbure du trajet de l'onde directe vers la Terre. Si l'atmosphère est caractérisée par une «sous-réfraction» suffisante, l'onde rencontre la surface de la Terre, ce qui se traduit par un affaiblissement dû à la diffraction (parfois appelé affaiblissement dû à l'obstruction ou affaiblissement dû au renflement de la Terre). La quantité d'affaiblissement par diffraction jugée acceptable est le facteur qui détermine le dégagement du trajet.

La courbure par réfraction s'exprime en général par le rayon terrestre équivalent ou facteur k . Pour éviter le calcul de la courbure du trajet lors de la conception d'une liaison, il est possible d'utiliser le rayon terrestre équivalent à la place du rayon terrestre réel. Selon cette configuration géométrique modifiée, la différence entre le trajet de l'onde directe et la courbure de la surface terrestre est constante et le trajet de l'onde directe peut être représenté sous forme d'une ligne droite, ce qui facilite l'identification des obstacles éventuels dus au profil du terrain ou à la surface de la Terre. Le facteur k correspond au rapport entre le rayon terrestre équivalent et le rayon terrestre réel. Il a une valeur médiane d'environ $4/3$ pour une atmosphère radioélectrique normale, des valeurs inférieures dans des conditions de sous-réfraction et des valeurs supérieures dans des conditions de superréfraction (lorsque le gradient du coïndice de réfraction tend vers -157 unités N/km, le facteur k tend vers l'infini). La Recommandation UIT-R P.834 fournit l'équation du facteur k .

On présente dans un premier temps l'origine de l'équation donnée par la Recommandation UIT-R P.530 pour calculer les statistiques d'affaiblissement par diffraction, accompagnée des procédures permettant de déterminer le dégagement du trajet sur l'antenne principale et les antennes de diversité. Des exemples d'application sont ensuite fournis.

3.3.1 Principe de la méthode de prévision de l'affaiblissement dû à la diffraction

La formule contenue dans la Recommandation UIT-R P.530 pour déterminer les statistiques de l'affaiblissement dû à la diffraction repose sur des mesures effectuées au-dessus d'un terrain moyennement accidenté aux États-Unis d'Amérique [Vigants, 1981]. Dans l'application de cette formule, on part de l'hypothèse que la probabilité de dépassement d'une profondeur d'évanouissement donnée est identique à la probabilité de non-dépassement du facteur k équivalent qui donne un dégagement normalisé correspondant h/F_1 , où h est la hauteur de l'obstruction la plus importante et F_1 le rayon de la première zone de Fresnel.

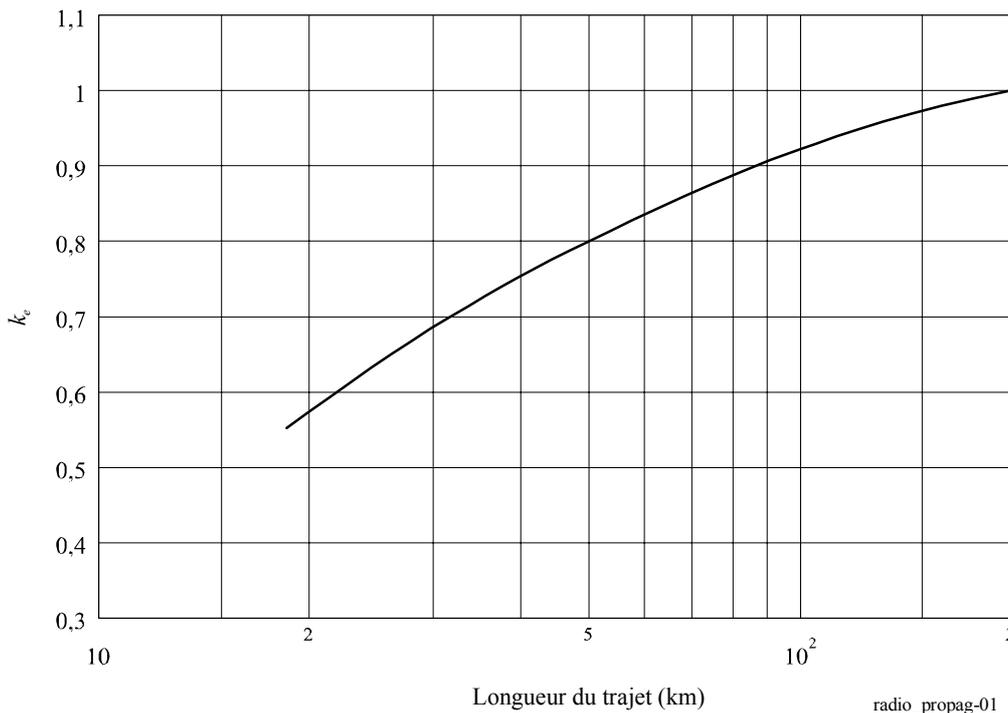
3.3.2 Principe des procédures permettant de déterminer le dégagement du trajet

Les procédures de la Recommandation UIT-R P.530 visant à déterminer le dégagement du trajet de l'antenne principale et des antennes de diversité d'espace ont été élaborées en l'absence d'une procédure précise de calcul du dégagement du trajet, valable pour le monde entier, pour une tolérance donnée d'affaiblissement dû à la diffraction. La Fig. 1, tirée de la Recommandation UIT-R P.530, repose sur des mesures de trajet obtenues dans des conditions de climat continental tempéré [Boithias et Battesti, 1967].

Le pourcentage 99,9% qui accompagne la figure est cependant quelque peu incertain. L'application de la valeur du facteur k équivalent obtenue à partir de la courbe de cette figure a donné un dégagement acceptable pour des liaisons sans diversité ou pour l'antenne principale dans le cas de liaisons avec diversité d'espace de longueur supérieure à 45 km avec un rayon de $0,6 F_1$. Cela étant, ainsi que l'indique la Recommandation UIT-R P.530, pour éviter d'avoir des hauteurs d'antenne excessives, il est acceptable d'utiliser de plus petites fractions de F_1 à des fréquences inférieures à 2 GHz.

À noter le développement de techniques applicables à certaines régions pour fixer le dégagement du trajet à partir d'une valeur connue d'évanouissement par diffraction [Kalinin, 1979; Nadenenko, 1981; Schiavone, 1981; Vigants, 1981 et Olsen et Segal, 1992], qui pourraient, à l'avenir, servir de base à l'élaboration d'une procédure précise, valable pour l'ensemble de la planète.

FIGURE 1
Valeur de k dépassée pendant environ 99,99% du mois le plus défavorable
(climat continental tempéré)



Exemple de calcul:

Paramètres de l'exemple:

Longueur du trajet: 30 km

Climat tropical

Fréquence d'exploitation: 15 GHz

Obstacle le plus élevé à arête en lame de couteau situé à 10 km de l'émetteur

Hauteur de l'obstacle le plus élevé: 30 m

Pas de données disponibles sur le facteur k médian

Dégagement souhaité: $1,0 F_1$

Les étapes présentées ci-dessous permettent d'évaluer la hauteur nécessaire des antennes. Elles suivent la procédure décrite au § 2.2.2.1 de la Recommandation UIT-R P.530 et utilisent les paramètres ci-dessus.

Étape 1: Déterminer la hauteur d'antenne nécessaire pour la valeur médiane appropriée du facteur k ponctuel (en l'absence de données, prendre $k = 4/3$) et le dégagement $1,0 F_1$ pour l'obstacle le plus élevé (climats tempérés et tropicaux):

$$F_1 = 17,3 \sqrt{\frac{d_1 d_2}{fd}} = 17,3 \sqrt{\frac{10 \cdot 20}{15 \cdot 30}} = 17,3 \sqrt{0,44} = 11,5 \text{ m} \quad (4)$$

Le calcul du renflement de la Terre au niveau de l'obstacle dominant pour $k = 4/3$ donne: $b = 11,8$ m avec un rayon terrestre = 6 360 km.

En prenant pour hypothèse une hauteur identique pour l'antenne d'émission et l'antenne de réception, ce résultat fournit une hauteur d'antenne supérieure à $30 + 11,5 + 11,8 = 53,3$ m.

Étape 2: Déduire de la Fig. 1 la valeur de k_e (99,9%) pour la longueur du trajet en question.

La valeur de k_e s'obtient facilement à partir de la Fig. 1:

$$k_e = 0,69$$

Étape 3: En répétant les calculs ci-dessus avec $k = k_e = 0,69$, le renflement de la terre donne $b = 22,8$ m. La valeur de $0,6 F_1 = 6,9$ m donnent une hauteur d'antenne égale à $30 + 6,9 + 22,8 = 59,7$ m.

Étape 4: On choisit la hauteur d'antenne la plus grande, soit un résultat final de 59,7 m.

3.4 Évanouissements par scintillation

Les irrégularités de l'indice de réfraction résultant de la turbulence peuvent entraîner des scintillations d'amplitude et des variations de l'angle d'arrivée du signal reçu. Ces effets sont présents sur tous les trajets en visibilité directe aux hyperfréquences et au-delà, mais ils peuvent être masqués par les évanouissements par trajets multiples et d'autres phénomènes afférents.

La variance du logarithme de l'amplitude du signal reçu due aux scintillations est donnée par Tatarskii [1967]:

$$\sigma_x^2 = 42,25 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^{7/6} \int C_n^2(r) r^{5/6} dr \quad (5)$$

où:

σ_x : écart type du logarithme de la puissance reçue

λ : longueur d'onde (m)

C_n^2 : fonction de structure de l'indice de réfraction ($\text{m}^{-2/3}$)

r : distance le long du trajet.

C_n^2 est un paramètre macroscopique qui varie dans l'espace et dans le temps, principalement avec l'altitude. Les valeurs pour une altitude donnée peuvent varier de plusieurs ordres de grandeur sur des périodes de dizaines de minutes. Les valeurs les plus élevées de C_n^2 se situent au niveau de la couche limite planétaire (qui recouvre la surface terrestre jusqu'à une altitude comprise entre 1 et 2 km, en fonction de la région climatique, de la saison et de l'heure du jour). Les valeurs types de ce paramètre se situent entre 10^{-14} et 10^{-12} [COST 1996], mais il peut varier entre 10^{-25} et $10^{-10} \text{ m}^{-2/3}$ [Gossard, 1977].

L'effet de scintillation d'amplitude est plus important dans les liaisons par satellite. Des mesures [Crane, 1976] effectuées à 7 GHz et pour des angles d'élévation supérieurs à 3° montrent des fluctuations de signal comprises entre 0,1 dB et 1 dB environ, en fonction de l'angle d'élévation et des conditions. Les niveaux augmentent avec la fréquence pour atteindre, à 100 GHz, une valeur comprise entre 0,4 dB et 3,8 dB.

3.5 Résumé des mécanismes de propagation associés aux évanouissements par trajets multiples

Dans des conditions de propagation normales, il ne devrait y avoir qu'un seul trajet de propagation entre les deux antennes sur un faisceau hertzien en visibilité directe. En pratique, pendant un certain pourcentage du temps, il peut exister plus d'un trajet de propagation (trajets multiples), les brouillages entre les signaux reçus sur ces trajets pouvant entraîner un évanouissement important.

L'évanouissement dû à la propagation par trajets multiples est le plus grave des mécanismes d'évanouissement par temps clair. Étant donné qu'ils sont sélectifs en fréquence, la distorsion résultante (voir § 6) à tous les niveaux d'amplitude sur une liaison numérique à large bande peut être une source majeure d'interruption de service.

Les mécanismes de propagation responsables des évanouissements et des effets de phase graves sur les trajets horizontaux ou faiblement obliques sont dus à l'apparition de conditions de propagation par trajets multiples pendant lesquelles les rayons non souhaités brouillent le signal direct normal.

Les conditions de propagation par trajets multiples se présentent généralement en cas de réflexion:

- par le sol, l'eau et des structures surfaciques;
- du fait de valeurs très négatives du gradient du coïndice de réfraction dans la basse atmosphère (voir le Manuel *Radiométéorologie* de l'UIT-R);
- du fait de la combinaison de réflexions par le sol et de l'influence des couches de la troposphère.

Lors de l'examen des phénomènes d'évanouissement, il importe de distinguer d'une part l'évanouissement lent non sélectif dû à des effets de propagation par trajet unique, qui apparaît également dans des conditions d'atmosphère stratifiée associées à la formation de conduits (Manuel *Radiométéorologie* de l'UIT-R), et d'autre part l'évanouissement sélectif en fréquence, plus rapide, qui est dû à des couches caractérisées par des valeurs très négatives des gradients du coïndice de réfraction situées sous le trajet, évanouissement qui est maximal lorsque le centre de la couche se situe juste au-dessous du trajet [Olsen *et al.*, 1987]. On observe fréquemment des combinaisons de ces différents mécanismes d'évanouissement.

4 Affaiblissement dû aux précipitations et autres particules atmosphériques

4.1 Affaiblissement dû aux précipitations

L'affaiblissement dû aux précipitations le long d'un trajet peut se calculer en intégrant l'affaiblissement linéique sur la longueur du trajet, si la variation du taux de précipitation le long du trajet est connue.

Le taux de précipitation est inhomogène dans l'espace et dans le temps. Le Manuel *Radiométéorologie* de l'UIT-R fournit divers modèles de précipitation, qui ont été développés pour refléter cette complexité. On sait que les cellules de pluie s'agglomèrent fréquemment pour former des régions de précipitation parfois appelées petites régions de méso-échelle [Segal, 1979 et Crane, 1979]. Les enregistrements de pluviométrie montrent de courts intervalles avec des taux élevés de précipitation insérés dans de longues périodes de légères précipitations. Les observations des radars météorologiques montrent de petites régions avec un fort taux de précipitation incluses dans de plus vastes régions de précipitations plus légères. Les liaisons de Terre dépassant 10 km peuvent donc traverser plus d'une cellule de précipitation à l'intérieur d'une région de pluie. De plus, les calculs d'affaiblissement doivent tenir compte de l'influence des précipitations de plus faible intensité qui entourent la cellule. La longueur de ces régions augmente lorsque l'intensité des précipitations décroît et peut atteindre plusieurs dizaines de kilomètres.

Les différentes méthodes développées pour prévoir les statistiques d'affaiblissement dû aux précipitations à partir des mesures de taux de précipitation se distinguent principalement par les modèles utilisés pour décrire la structure temps-espace du taux de précipitation.

La «méthode de l'orage synthétique» produit des statistiques d'affaiblissement en convertissant des profils «taux de précipitation/temps» enregistrés en un point donné en des profils «taux de précipitation/distance» à partir de la vitesse de translation de la cellule de pluie, qui est assimilée à la vitesse du vent [Drufuca, 1974; Bertok *et al.*, 1977 et Segal, 1982].

Toutes les autres méthodes utilisent des distributions cumulatives du taux de précipitation mesuré en un point donné. Certaines méthodes fournissent le profil statistique de précipitation le long du trajet en considérant soit une cellule unique de forme adaptée [Misme et Fimbel, 1975], soit une distribution statistique en taille pour des cellules ayant une forme particulière [Capsoni *et al.*, 1987]. D'autres méthodes caractérisent le profil statistique de précipitation simplement par un coefficient de réduction, lequel peut être tiré de la fonction de corrélation spatiale des précipitations, de mesures obtenues à partir de pluviomètres à réponse rapide espacés le long d'une ligne [Harden *et al.*, 1978 et Crane, 1980] ou d'une loi semi-empirique. En multipliant le taux de précipitation ponctuel par ce coefficient de réduction, on obtient le taux de précipitation équivalent moyenné sur le trajet.

Une autre procédure consiste à appliquer le coefficient de réduction à la longueur de trajet réelle. On obtient ainsi une longueur de trajet équivalente sur laquelle l'intensité de pluie peut être considérée comme constante [Lin, 1975; Garcia-Lopez et Peiro, 1983; Moupfouma, 1984 et Dissanayake et Allnutt, 1992]. C'est ce type de procédure qui est actuellement adopté dans la méthodologie préconisée par la Recommandation UIT-R P.530.

4.1.1 Principe de la méthode de prévision de l'affaiblissement dû aux précipitations

La procédure de prévision de l'affaiblissement dû aux précipitations actuellement préconisée par la Recommandation UIT-R P.530 est tirée d'une analyse de mesures simultanées des taux de précipitation et de la propagation, effectuées principalement en Europe, auxquelles on a ajouté des données venant du Japon et des États-Unis d'Amérique. Cette procédure utilise le concept de longueur de trajet équivalente afin de prendre en compte le profil non uniforme de l'intensité de pluie le long du trajet réel. Elle repose sur l'estimation de l'affaiblissement dépassé pendant 0,01% du temps ($A_{0,01}$) à partir du taux de précipitation dépassé pendant le même pourcentage de temps ($R_{0,01}$). Pour une valeur donnée de $R_{0,01}$, l'affaiblissement linéique est calculé et multiplié par la longueur de trajet équivalente, ce qui fournit la valeur correspondante de $A_{0,01}$:

$$A_{0,01} = \gamma_R \cdot d \cdot \frac{1}{1 + d/d_0} \quad (6)$$

où:

γ_R : affaiblissement linéique

d : longueur du trajet

d_0 : longueur équivalente des cellules de pluie.

Pour calculer la distribution totale de l'affaiblissement, on utilise des équations empiriques, qui permettent de changer de facteur d'échelle et de passer à d'autres pourcentages du temps (p). Ces équations sont tirées de données expérimentales. Pour les liaisons radioélectriques situées à des latitudes supérieures ou égales à 30° (nord ou sud):

$$\frac{A_p}{A_{0,01}} = 0,12 p^{-(0,546 + 0,043 \log_{10} p)} \quad (7)$$

Pour des liaisons radioélectriques situées à des latitudes inférieures à 30° (nord ou sud):

$$\frac{A_p}{A_{0,01}} = 0,07 p^{-(0,855 + 0,139 \log_{10} p)} \quad (8)$$

Les deux équations ont été déterminées pour des pourcentages de temps compris entre 1% et 0,001%, leur utilisation devant se limiter à cet intervalle. Le concept d'équiprobabilité n'étant pas compatible avec des données météorologiques, il n'est pas entièrement satisfaisant d'un point de vue théorique. En outre, étant donné que la méthode n'utilise qu'un seul point sur la distribution du taux de précipitation, elle produit la même distribution d'affaiblissement pour deux sites caractérisés par des distributions de taux de précipitation différentes mais par une même valeur de $R_{0,01}$. Cela étant, on a observé que les distributions d'affaiblissement sont généralement parallèles, et ce plus souvent que les distributions de taux de précipitation. Quoi qu'il en soit, la précision obtenue avec cette méthode de prévision pour les liaisons terrestres est compatible avec la qualité et la variabilité des données d'intensité de pluie dont on dispose.

4.1.2 Affaiblissement linéique

L'affaiblissement linéique γ_R (dB/km) à une fréquence donnée peut être calculé à partir du taux de précipitation, obtenu par la connaissance de l'indice complexe de réfraction de l'eau à la température des gouttes de pluie, de la vitesse limite et de la distribution en taille des gouttes de pluie [Ryde et Ryde, 1945; Medhurst, 1965 et Setzer, 1970]. Étant donné que les gouttes de pluie ne sont pas sphériques, les ondes à polarisation horizontale subissent un affaiblissement supérieur aux ondes à polarisation verticale [Morita *et al.*, 1974 et Chu, 1974]. Sous certains climats, la différence d'affaiblissement peut atteindre jusqu'à 35% [Fedi *et al.*, 1977 et Fimbel et Juy, 1977]. L'affaiblissement linéique pour des polarisations verticales et horizontales à des fréquences allant jusqu'à 100 GHz peut être obtenu par des calculs très complets prenant en compte la forme non sphérique des gouttes de pluie [Oguchi et Hosoya, 1974; Chu, 1974 et Oguchi, 1977].

Pour les applications pratiques, la relation entre l'affaiblissement linéique γ_R (dB/km) et le taux de précipitation R (mm/h) peut être approchée par la loi de puissance suivante [Olsen *et al.*, 1978]:

$$\gamma_R = k R^\alpha \quad (9)$$

Les valeurs de k et α ont été calculées à plusieurs fréquences dans la gamme 1-1 000 GHz, pour plusieurs températures de gouttes et plusieurs distributions en taille de gouttes, en prenant pour hypothèse des gouttes sphériques [Olsen *et al.*, 1978].

Des travaux récents menés par Gibbins et Walden [2003] présentent les résultats d'une étude détaillée sur la nature des paramètres k et α . Ces résultats ont servi de base à la Recommandation UIT-R P.838.

Les valeurs des coefficients k et α sont exprimées en fonction de la fréquence, f (GHz), dans la gamme 1-1 000 GHz, à partir des équations figurant dans la Recommandation UIT-R P.838, qui ont été élaborées en ajustant les courbes aux coefficients de la loi puissance tirés des calculs de diffusion.

Les valeurs des constantes à utiliser dans le calcul des coefficients k_H , k_V , α_H et α_V , requis pour le calcul de k et α , figurent dans la Recommandation UIT-R P.838.

Le Manuel *Radiométéorologie* de l'UIT-R présente une étude plus détaillée de la relation entre affaiblissement linéique et taux de précipitation.

4.1.3 Longueur de trajet équivalente

La longueur de trajet équivalente dans des liaisons de Terre désigne la longueur d'un trajet fictif obtenue à partir de données radioélectriques en divisant l'affaiblissement total dépassé pendant 0,01% du temps par l'affaiblissement linéique dépassé pendant le même pourcentage de temps.

Le facteur de réduction du trajet r est donné par la formule:

$$r = \frac{1}{1 + d/d_0} \quad (10)$$

L'équation a été obtenue en posant deux hypothèses:

- modélisation de la structure spatiale de la pluie par une cellule de pluie équivalente caractérisée par une section transversale rectangulaire de longueur équivalente d_0 dans le plan du trajet;
- équiprobabilité des positions de la section transversale rectangulaire de la cellule de pluie par rapport au trajet.

La longueur de trajet équivalente $d_{equ} = dr$ correspond à la longueur moyenne de l'intersection entre le trajet et la cellule de pluie équivalente, positionnée aléatoirement, de longueur d_0 pour un dépassement de 0,01%.

La longueur d_0 de la cellule de pluie équivalente était initialement supposée constante, mais le modèle a été amélioré en prenant l'hypothèse d'une dépendance par rapport à l'intensité des précipitations [Yamada *et al.*, 1987]:

$$d_0 = 35 e^{-0,015 R_{0,01}} \quad (11)$$

Pour $R_{0,01} > 100$ mm/h, il convient de prendre, à la place de $R_{0,01}$, la valeur 100 mm/h.

Cette équation, obtenue à partir de données d'affaiblissement dû aux précipitations sur un trajet oblique, a également été appliquée avec succès à des résultats de mesures d'affaiblissement sur des liaisons de Terre.

4.1.4 Exemples d'application

Lieu: Rio de Janeiro, Brésil

Latitude: 22° 50' S

Longitude: 317° 00' E

Fréquence: $f = 13$ GHz

Longueur du trajet: $d = 20$ km

Polarisation linéaire: $\tau = 90^\circ$

Étape 1: En appliquant la Recommandation UIT-R P.837 (cartes mondiales de taux de précipitation) pour cette position, on obtient le taux de précipitation dépassé pendant 0,01% du temps: $R_{0,01} = 59,67$ mm/h.

Étape 2: L'affaiblissement linéique γ_R pour la fréquence, la polarisation et le taux de précipitation considérés est évalué en utilisant la Recommandation UIT-R P.838, ce qui donne $\gamma_R = 2,82$ dB/km.

Étape 3: Dans l'étape 3, on calcule la longueur de trajet équivalente, soit $d_{equ} = d \times r = 20 \times 0,42 = 8,34$ km, et on en déduit une valeur approchée de l'affaiblissement sur le trajet dépassée pendant 0,01% du temps:

$$A_{0,01} = \gamma_R d_{eff} = 23,4 \quad \text{dB} \quad (12)$$

Enfin, en utilisant la formule correspondant aux liaisons radioélectriques inférieures à 30°, on calcule l'affaiblissement dû aux précipitations dépassé pendant 0,001%, 0,01%, 0,1% et 1%, soit respectivement $A_{0,001} = 33,9$ dB, $A_{0,01} = 23,4$ dB, $A_{0,1} = 8,5$ dB et $A_1 = 1,6$ dB.

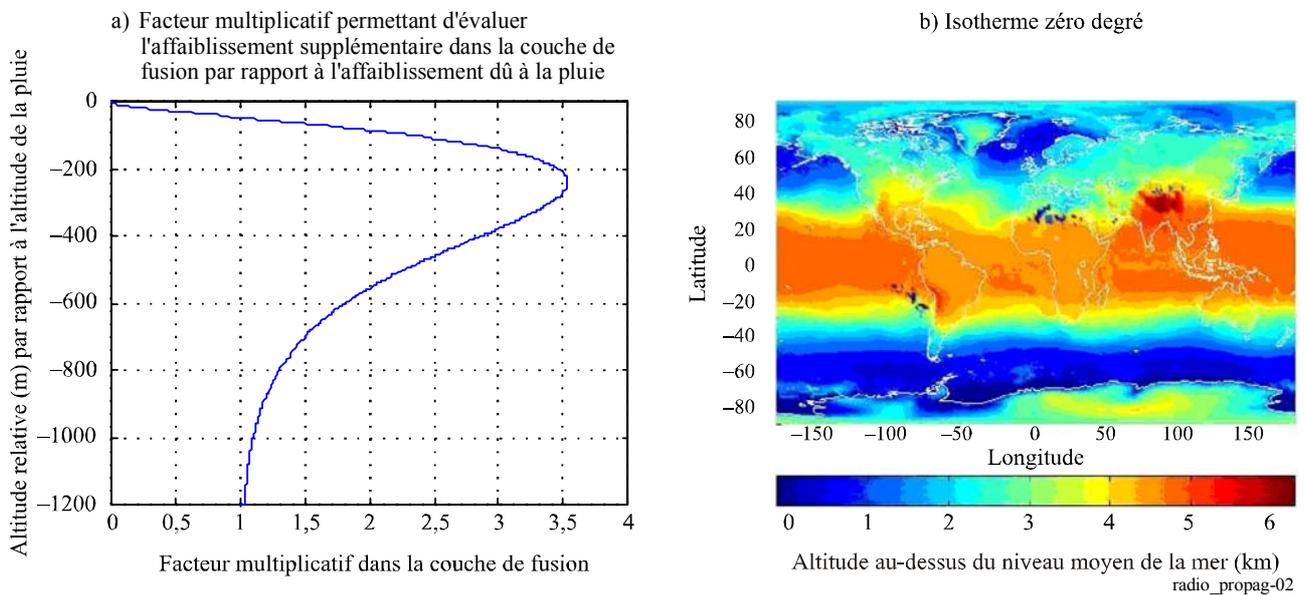
4.1.5 Prévion de l'affaiblissement combiné dû à la pluie et à la neige mouillée

La méthode figurant dans la Recommandation UIT-R P.530 repose sur une proposition faite en 2002 par Bacon et Eden et sur les développements ultérieurs, avec une mise en œuvre approchante, comme indiqué dans Tjelta *et al.* [2005]. Cette méthode utilise une carte mondiale des altitudes de précipitation et des données indirectes pour estimer la quantité de neige mouillée, ainsi qu'un profil d'affaiblissement moyen pour déterminer l'affaiblissement supplémentaire dans la couche de fusion. Elle prend ensuite pour hypothèse

une certaine répartition des altitudes de précipitation, ou isotherme à zéro degré, et une courbe fixe de l'affaiblissement supplémentaire dans la couche de fusion en fonction de la position dans la couche. En exploitant ces données, il est possible de prévoir la distribution de l'affaiblissement sur toute liaison en tenant compte à la fois de la pluie et de la neige mouillée.

La couche de fusion consiste en un mélange de glace, d'eau et d'air. Pendant leur chute, les hydrométéores de glace fondent, s'agglomèrent puis se séparent en gouttes de pluie. Lorsque la température de l'air se situe au voisinage de 0°, on observe parfois, le long du trajet de propagation, des précipitations d'hydrométéores sous forme de neige mouillée. La théorie de l'affaiblissement dû aux précipitations est bien comprise et relativement bien modélisée pour les gammes de fréquence actuellement en exploitation. Les coefficients d'extinction théoriques ont été déterminés pour différentes tailles et formes de particule; des modèles simplifiés d'affaiblissement linéique ont été élaborés en fonction de la fréquence et de la polarisation des ondes radioélectriques, et de l'angle du trajet par rapport au grand axe des grandes gouttes de pluie non sphériques. Les particules de neige mouillée, pour leur part, posent des difficultés de modélisation nettement plus importantes. On peut cependant noter quelques tentatives. Les analyses théoriques de la propagation des ondes radioélectriques dans la couche de fusion reposent sur des modèles de particules de glace en fusion. On a déterminé que les particules de neige mouillée présentent des coefficients d'extinction plus élevés que les gouttes de pluie contenant la même quantité d'eau liquide, et produisent donc un affaiblissement linéique supplémentaire par rapport à la pluie (voir [Jain et Watson, 1985 et Kuznetov *et al.*, 2000] pour une étude récente). Le terme radar utilisé à ce propos est «bande brillante», car cette couche produit sur les radars de forts échos. Outre l'affaiblissement copolaire, la nature anisotrope des particules de neige mouillée peut également produire une dépolarisation.

FIGURE 2



La méthode de prévision combinée pour la pluie et la neige mouillée présentée ici repose sur une approximation simplifiée. On introduit un facteur multiplicatif, qui permet de décrire si l'affaiblissement linéique est différent de celui dû à la pluie uniquement. Le facteur vaut 1 pour la pluie; il est supérieur à 1 pour la neige mouillée, avec un maximum légèrement supérieur à 3,5, et il vaut zéro pour la neige sèche ou la glace. Le modèle caractérisé par l'équation (18) est présenté sous forme graphique à la Fig. 2a), qui représente le facteur multiplicatif en fonction de l'altitude de la couche de fusion mesurée par rapport à l'altitude maximale de la pluie.

Le facteur multiplicatif $\Gamma(h)$ est donné par la formule suivante:

$$\Gamma(h) = \begin{cases} 0 & 0 < h \\ \frac{a(1 - e^{h/b})^2}{\left(1 + \left(1 - e^{-(h/c)^2}\right)^2 \left(a(1 - e^{h/b})^2 - 1\right)\right)} & h \leq 0 \end{cases} \quad (13)$$

où les constantes a , b et c valent respectivement 4, 70 et 600. En première approximation, ces trois constantes ont une influence respectivement sur la valeur maximale du facteur multiplicatif, sur la position relative par rapport au dessus de la couche et sur l'épaisseur de la couche. La fonction tend asymptotiquement vers 1 pour de grandes valeurs négatives de h ; en pratique, avec les valeurs des constantes a , b , et c indiquées ci-dessus, elle vaut 1 pour $h < -1\ 400$.

Le facteur multiplicatif à utiliser dans les prévisions correspond à une intégrale des facteurs multiplicatifs pondérés de la fonction de densité de probabilité de l'altitude relative de la couche de fusion le long du trajet. Le facteur multiplicatif est exprimé par rapport à l'altitude de l'isotherme zéro degré.

La prévision combinée pour la pluie, la neige mouillée et la neige sèche ou la glace repose sur une méthode simple et sur les hypothèses suivantes:

- le taux de précipitation est connu, par exemple à partir de la carte figurant dans la Recommandation UIT-R P.837;
- les précipitations sont classées en pluie, neige mouillée et neige sèche ou glace, en utilisant l'altitude de la pluie (comme indiqué dans la carte figurant dans la Recommandation UIT-R P.839) et un modèle de couche de fusion, comme décrit ci-dessus;
- la distribution de l'affaiblissement combiné pour les précipitations de pluie et de neige est identique à la distribution pour la pluie uniquement.

L'élément essentiel de la méthode est la détermination d'un facteur multiplicatif qui prenne en compte la contribution de la neige mouillée et de la neige sèche. Si toutes les précipitations observées sont des précipitations de pluie, ce facteur vaut 1 et les résultats obtenus avec la procédure actuelle ne sont pas modifiés (voir Recommandation UIT-R P.530). Mais si toutes les précipitations observées sont constituées de neige sèche ou de glace, le facteur est égal à 0 et il n'est pas possible d'évaluer l'affaiblissement, ce qui est assez différent, à l'évidence, de la méthode actuelle. Étant donné que l'altitude du zéro degré varie au cours de l'année et que la majeure partie des précipitations sont des précipitations de pluie, le cas réaliste correspond à une combinaison de neige sèche et de neige mouillée. Dans la neige humide, l'affaiblissement peut être nettement plus important que dans la pluie. Ainsi, en tenant compte de l'ensemble des possibilités, le facteur multiplicatif a toutes les chances d'être supérieur à 1, de sorte qu'il est nécessaire de prendre une marge additionnelle pour tenir compte de la neige mouillée.

Deux éléments doivent être déterminés pour appliquer cette procédure: l'altitude moyenne de la pluie par rapport à l'altitude de l'isotherme zéro degré, ainsi que sa variation ou distribution. Les données relatives à l'altitude de la pluie figurent dans la Recommandation UIT-R P.839. Les données relatives à l'altitude du zéro degré sont présentées en Fig. 2b). On considère que l'altitude de la pluie suit une distribution normale de moyenne égale à zéro, avec un écart type de 800 m, et qu'elle est identique sur l'ensemble de la planète. L'affaiblissement A_p dépassé pendant le pourcentage de temps p , donné dans le paragraphe précédent, est valable pour les trajets de liaison sur lesquels se produisent uniquement des précipitations liquides. La Recommandation UIT-R P.530 fournit une procédure pas à pas.

La Fig. 3 illustre un exemple d'application de cette procédure à certaines villes réparties entre l'Équateur et le pôle Nord. On estime qu'il convient d'ajouter 10 dB d'affaiblissement dû à la neige mouillée avec $p = 0,001\%$ pour une année moyenne.

FIGURE 3
 Estimation de l'affaiblissement dû à la neige mouillée, à $p = 0,001\%$, pour une année moyenne dans quelques villes réparties de l'Equateur au pôle Nord

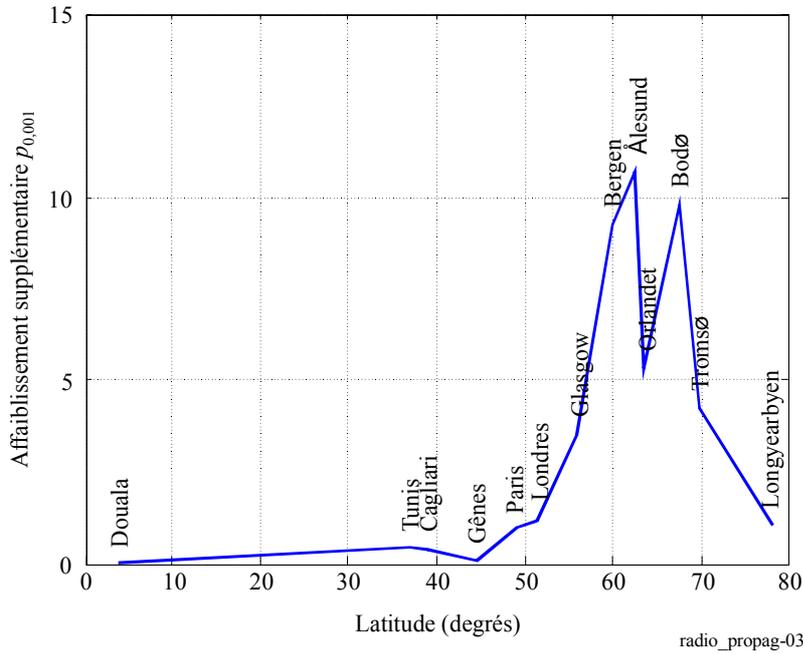
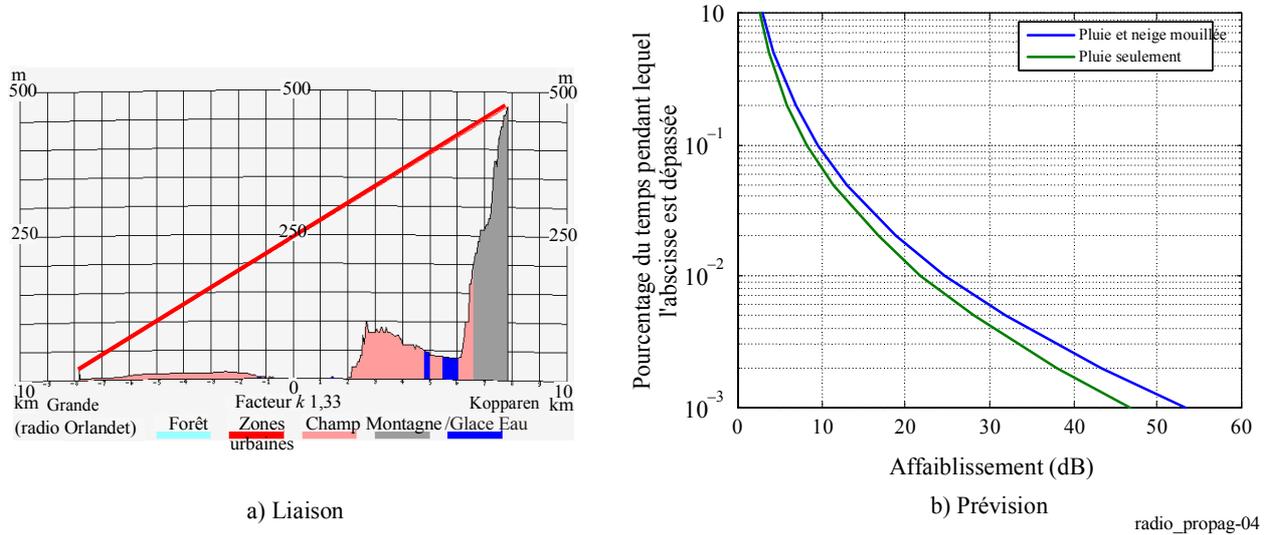


FIGURE 4
 Exemple de prévision pour une liaison côtière en Norvège [Tjelta *et al.*, 2006] utilisant un facteur multiplicatif moyenné pour un trajet incliné



Pour l'heure, on ne dispose pas de résultats d'essai. Certaines publications présentent des mesures indiquant un affaiblissement supplémentaire dû à la neige mouillée. Ces mesures concernent le Japon, le Canada, le Royaume-Uni et la Norvège: Takada et Nakamura, 1966; Nishitsuji, 1971; Hendry *et al.*, 1981; Gutteberg, 1983; Kharadly *et al.*, 1983; Kharadly et Owen, 1988; Thurai et Woodroffe, 1997; Walden *et al.*, 2003; Tjelta *et al.*, 2005 et Tjelta *et al.*, 2006.

4.1.6 Similitudes à long terme en polarisation et en fréquence pour les statistiques de l'affaiblissement dû à la pluie

4.1.6.1 Similitude monofréquence

Si l'on ne dispose que des données d'affaiblissement mesurées à une seule fréquence, on peut appliquer la formule empirique figurant dans la Recommandation UIT-R P.530 pour déterminer l'affaiblissement à d'autres fréquences sur le même trajet, dans la gamme 7-50 GHz (et, à titre indicatif, jusqu'à 100 GHz). Cette formule donne un rapport d'affaiblissement directement sous la forme d'une fonction de la fréquence et de l'affaiblissement:

$$A_2 = A_1 (\Phi_2 / \Phi_1)^{1-H(\Phi_1, \Phi_2, A_1)} \quad (14)$$

où:

$$\Phi(f) = \frac{f^2}{1 + 10^{-4} f^2} \quad (15)$$

$$H(\Phi_1, \Phi_1, A_1) = 1,12 \times 10^{-3} (\Phi_2 / \Phi_1)^{0,5} (\Phi_1 A_1)^{0,55} \quad (16)$$

A_1 et A_2 sont les valeurs de l'affaiblissement supplémentaire dû à la pluie respectivement aux fréquences f_1 et f_2 (GHz), dépassées avec une même probabilité.

Il est apparu que cette formule était la meilleure fonction empirique approchant des données disponibles aux différentes fréquences [Boithias, 1989]. Étant donné que la précision de cette procédure est nettement située dans la fourchette de 10%, il convient normalement d'appliquer une telle technique de similitude en fréquence lorsque les mesures permettent d'obtenir une distribution à long terme.

La similitude en fréquence est étudiée de façon plus détaillée dans le Manuel *Radiométéorologie* de UIT-R, lequel propose, comme autre solution, une méthode reposant sur les constantes k et α , qui est donc plus adaptée lorsqu'une similitude en polarisation est requise. D'autres méthodes utilisent des statistiques d'affaiblissement mesurées à deux fréquences ou des données sur l'angle d'élévation pour prévoir l'affaiblissement à une autre fréquence.

4.1.6.2 Similitude en polarisation

Si l'on ne dispose que des données d'affaiblissement mesurées pour une seule polarisation (verticale ou horizontale), on peut appliquer les équations (37) et (38) de la Recommandation UIT-R P.530 [Boithias, 1983] pour déterminer l'affaiblissement dû à la pluie pour d'autres polarisations, dépassé avec une même probabilité, dans les plages de longueurs de trajet et de fréquences correspondant à la méthode de prévision de l'affaiblissement.

La similitude en polarisation ne doit être appliquée qu'aux mesures ou calculs de l'affaiblissement dû à la pluie. Il convient en outre d'ajouter l'affaiblissement supplémentaire dû à l'absorption par les gaz. Les expressions fournies dans la Recommandation UIT-R P.530 sont globalement en accord avec les résultats expérimentaux et avec les estimations effectuées à l'aide des coefficients d'affaiblissement linéique de la Recommandation UIT-R P.838:

$$A_V = \frac{300 A_H}{335 + A_H} \quad \text{dB} \quad (17)$$

ou

$$A_H = \frac{335 A_V}{300 - A_V} \quad \text{dB} \quad (18)$$

Ces expressions sont jugées valables pour les gammes de longueurs de trajet et de fréquences applicables à la méthode de prévision de l'affaiblissement dû à la pluie. À noter cependant que les calculs des ratios de similitude en polarisation effectués à partir de données radar semblent indiquer que ceux-ci sont plus élevés pour les précipitations de convection que pour les précipitations stratiformes, ce qui peut engendrer une dépendance par rapport aux conditions climatiques.

4.1.7 Statistiques de durée et de fréquence des évanouissements dû aux précipitations

Les procédures permettant de déterminer les statistiques de durée des évanouissements dus aux précipitations figurent dans la Recommandation UIT-R P.530.

Bien qu'à ce jour peu d'informations soient disponibles sur la distribution globale de la durée des évanouissements, il existe certaines données et un modèle empirique pour des données statistiques particulières telles que la durée moyenne d'un évanouissement et le nombre d'évanouissements. On observe toutefois une différence entre la valeur moyenne et la valeur médiane de la durée, qui témoigne d'une asymétrie de la distribution globale de ce paramètre. En outre, de nombreux signes montrent que la durée des évanouissements par temps de pluie est considérablement supérieure à celle des évanouissements qui se produisent en cas de propagation par trajets multiples.

Un affaiblissement est défini ici comme étant le dépassement de la valeur d'affaiblissement A pendant une certaine période de temps (par exemple, 10 s ou plus). La relation entre le nombre d'affaiblissements $N(A)$, la durée moyenne $D_m(A)$ de ces événements et la durée totale $T(A)$ pendant laquelle l'affaiblissement A est dépassé pendant un laps de temps plus long qu'une valeur déterminée, est donnée par l'équation:

$$N(A) = T(A) / D_m(A) \quad (19)$$

La durée totale $T(A)$ dépend de la définition de l'événement. L'événement qui présente généralement un intérêt pour les applications est l'affaiblissement A d'une durée égale ou supérieure à 10 s. Cependant, des événements de durée plus courte (par exemple, un intervalle d'échantillonnage de 1 s utilisé dans une expérience) sont également utiles pour déterminer le pourcentage de temps d'interruption total imputé à l'indisponibilité (c'est-à-dire la durée totale de l'événement égale ou supérieure à 10 s).

On peut représenter le nombre d'évanouissements dépassant la valeur d'affaiblissement A pendant 10 s ou plus par l'équation:

$$N_{10s}(A) = a A^b \quad (20)$$

a et b étant les coefficients qui sont censés dépendre de la fréquence, de la longueur du trajet et d'autres variables telles que le climat.

Sur la base d'un ensemble de mesures effectuées pour un trajet de 15 km à une fréquence de 18 GHz sur la péninsule scandinave, les valeurs de a et de b estimées pendant un an sont les suivantes:

$$a = 5,7 \times 10^5 \quad b = -3,4 \quad (21)$$

Après avoir déterminé la valeur de $N_{10s}(A)$ à partir de l'équation (20), il est possible de calculer la durée moyenne des évanouissements d'une durée supérieure ou égale à 10 s en inversant l'équation (19).

L'ensemble de mesures susmentionné (pour un trajet de 15 km à une fréquence de 18 GHz situé sur la péninsule scandinave) permet d'imputer 95% à 100% de tous les phénomènes dus à la pluie dont le niveau est supérieur à 15 dB environ à l'indisponibilité. Cette fraction étant connue, il est possible de calculer la disponibilité en multipliant la fraction par le pourcentage de temps total pendant lequel une valeur d'affaiblissement A donnée est dépassée, selon la méthode décrite dans la Recommandation UIT-R P.530.

4.1.8 Variations saisonnières – mois le plus défavorable

Lors de la planification des systèmes, il est souvent nécessaire de connaître la valeur de l'affaiblissement dépassée pendant le pourcentage de temps P_W du «mois le plus défavorable» (voir la Recommandation UIT-R P.581).

La Recommandation UIT-R P.841 examine en détail la conversion des statistiques annuelles en statistiques pour le «mois le plus défavorable». La relation entre P_W et le pourcentage de temps annuel, P , peut s'exprimer ainsi:

$$P = Q_1^{\frac{1}{1-\beta}} P_W^{\frac{1}{1-\beta}} \quad (22)$$

Cette expression est valable pour l'intervalle de probabilités ($0,001\% < P < 3\%$). La Recommandation UIT-R P.841 fournit les valeurs de Q_1 et de β pour différents emplacements et plusieurs effets de propagation. À des fins de planification mondiale, il peut être préférable d'utiliser une équation «moyenne» unique, avec $Q_1 = 2,85$ et $\beta = 0,13$, ce qui donne:

$$P = 0,3 P_W^{1,15} \quad (23)$$

Les mesures effectuées sous différents climats indiquent que le ratio [moyenne du pourcentage de temps du mois le plus défavorable de l'année / moyenne du pourcentage de temps annuel] dépend du climat dans une certaine mesure. L'équation ci-dessus correspond à des climats présentant des variations saisonnières relativement faibles en intensité de précipitation. En ce qui concerne l'Europe méditerranéenne et l'Europe du nord-ouest, ainsi que d'autres régions présentant des variations saisonnières analogues en intensité de précipitation, la valeur de P indiquée ci-dessus doit être réduite de 20% et, dans les cas les plus extrêmes, de 30%.

4.1.9 Étude de l'évaluation du modèle (validation)

La Recommandation UIT-R P.311 fournit des critères de validation pour la comparaison des méthodes de prévision, notamment la définition d'une variable de test pour la comparaison des prévisions de l'affaiblissement dû à la pluie.

De vastes essais effectués sur la base des méthodes et des données disponibles préconisent l'adoption de la méthode figurant au § 2.4.1 de la Recommandation UIT-R P.530, la précision obtenue étant de 25%-30% environ, à l'échelle mondiale, pour des pourcentages de temps de 0,001% et 0,1%. Pour améliorer la précision de la prévision, il sera nécessaire de disposer de données statistiques à long terme, notamment en ce qui concerne les régions tropicales.

S'agissant des dépassements pendant 0,1% du temps, il n'est pas inutile de rappeler que les mesures d'intensité de pluie sont généralement de plus en plus imprécises à mesure que l'intensité de pluie décroît. En particulier, il se peut que l'absorption par les gaz ne soit plus négligeable à ces pourcentages de temps et qu'il faille donc l'ajouter aux prévisions d'affaiblissement dû à la pluie.

4.1.10 Exemple de calcul

À titre d'exemple, la distribution d'affaiblissement dû à la pluie est calculée pour une liaison possédant les caractéristiques suivantes:

Fréquence d'exploitation: 18 GHz

Latitude du point milieu: 12° 00' 00"

Longitude du point milieu: 44° 00' 00"

Longueur du trajet: 10 km

Polarisation: verticale

Étape 1: L'intensité de pluie, $R_{0,01}$, dépassée pendant 0,01% du temps (avec une durée d'intégration de 1 min) sera obtenue de préférence à partir de mesures à long terme effectuées par des sources locales. Si cette information n'est pas disponible, on peut en obtenir une estimation en se référant à la Recommandation UIT-R P.837. Cette Recommandation fournit des chiffres permettant d'obtenir rapidement une valeur approchée de $R_{0,01}$ ainsi qu'une méthode de calcul plus précise de ce paramètre, qui donne en l'occurrence $R_{0,01} = 50$ mm/h. Bien que la méthode préconise la prise en compte des coordonnées géographiques du point milieu de la liaison, on notera que l'utilisation des coordonnées de l'un des points extrêmes n'introduit pas d'erreur importante dans le calcul.

Étape 2: L'affaiblissement linéique γ_R (dB/km) est calculé conformément à la Recommandation UIT-R P.838.

$$\log_{10} k = \sum_{j=1}^4 a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_k \log_{10} f + c_k \quad (24)$$

$$\alpha = \sum_{j=1}^5 a_j \exp \left[- \left(\frac{\log_{10} f - b_j}{c_j} \right)^2 \right] + m_\alpha \log_{10} f + c_\alpha \quad (25)$$

où:

f : fréquence (GHz)

k : k_H ou k_V

α : α_H ou α_V .

Les coefficients a_j , b_j , c_k , m_k , c_α et m_α sont indiqués dans la Recommandation UIT-R P.838. Les coefficients k et α peuvent avoir une polarisation horizontale (H) ou verticale (V). En utilisant ces équations, on obtient, pour une polarisation verticale, α (18 GHz) = 1,002505 et k (18 GHz) = 0,077076. L'affaiblissement linéique vaut:

$$\gamma_R = k R_{0,01}^\alpha = 3,89 \quad \text{dB/km} \quad (26)$$

Étape 3: Calcul de la longueur de trajet équivalente $d_{\text{équi}}$:

$$d_0 = 35 \exp(-0,015 R_{0,01}) = 16,53 \text{ km} \quad (27)$$

$$r = \frac{1}{1 + d/d_0} = 0,623 \quad (28)$$

$$d_{\text{équi}} = d \cdot r = 6,23 \text{ km} \quad (29)$$

Étape 4: Valeur approchée de l'affaiblissement sur le trajet, dépassée pendant 0,01% du temps:

$$A_{0,01} = \gamma_R d_{\text{équi}} = 24,2 \quad \text{dB} \quad (30)$$

Étape 5: Conversion pour d'autres pourcentages de temps:

$$\frac{A_p}{A_{0,01}} = 0,12 p^{-(0,546 + 0,043 \log_{10} p)} \quad (31)$$

p (%)	A_p (dB)
1	2,9
0,1	9,2
0,01	24,2
0,01	51,7

Étape 6: Si l'on s'intéresse aux statistiques pour le mois le plus défavorable, on peut calculer les pourcentages annuels p correspondant aux pourcentages p_w pour le mois le plus défavorable en utilisant les informations relatives au climat données dans la Recommandation UIT-R P.841, soit à des fins de planification mondiale:

$$p(\%) = 0,30 p_w(\%)^{1,15} \quad (32)$$

Pour l'exemple considéré ici, on obtient:

p_w (%)	p (%)	A_p (dB)
1	0,3	5,5
0,1	0,021	18,1
0,01	0,0015	45,9

4.2 Liaisons en cascade et liaisons convergentes

4.2.1 Évanouissements corrélés sur des trajets en cascade

La qualité de fonctionnement globale d'un système en cascade dépend beaucoup des caractéristiques de propagation de chacune des liaisons. Pour de longs bonds et de faibles probabilités d'interruption de service, la probabilité d'évanouissement conjoint sur deux bonds ou plus est habituellement négligeable. Dans ces conditions, la probabilité totale d'interruption pour une série en cascade est égale à la somme des probabilités d'interruption sur chacune des liaisons [Peroni et Fedi, 1974], comme indiqué dans la Recommandation UIT-R P.530:

$$P_T = \sum_{i=1}^n P_i \quad (33)$$

où P_i est la probabilité d'interruption relative à la $i^{\text{ème}}$ liaison sur un total de n .

Dans le cas de bonds de courte longueur (c'est-à-dire comparable aux dimensions de la structure des précipitations responsables de l'affaiblissement), les liaisons adjacentes peuvent être touchées simultanément, d'où une probabilité totale d'interruption inférieure à la somme des probabilités élémentaires. La Recommandation UIT-R P.530 fournit l'équation suivante:

$$P_T = K \sum_{i=1}^n P_i \quad (34)$$

où K est un facteur de réduction tenant compte des effets de corrélation des précipitations pluviales.

Des mesures effectuées au Japon sur une série de liaisons de 4,5 km viennent étayer cette relation. On a observé des facteurs de réduction d'environ 0,8 pour l'interruption de service sur deux bonds et 0,7 sur quatre bonds, pour des probabilités d'interruption sur une seule liaison de 0,03% [Sasaki *et. al.*, 1976 et Morita et Higtuti, 1978].

Des calculs reposant sur la fonction de corrélation spatiale des précipitations observées au-dessus d'emplacements géographiques largement espacés au Canada indiquent que des facteurs de réduction analogues s'appliquent pour des longueurs de bond supérieures, soit en l'occurrence 10 bonds en cascade de 10 à 20 km chacun. Pour des longueurs de bond encore plus grandes, l'affaiblissement simultané n'est significatif que pour de grandes probabilités d'apparition [Segal, 1982].

Sur la base de ces expériences et calculs, la Recommandation UIT-R P.530 présente, sous forme graphique, le facteur de modification K en fonction, d'une part, du nombre de bonds, tous de même longueur, et ce pour différentes longueurs, et d'autre part, de différents niveaux de probabilité de dépassement moyennant une longueur de bond de 4,6 km.

4.2.2 Trajets convergents

On peut trouver dans la Recommandation UIT-R P.1410 des informations sur le facteur d'amélioration de diversité pour les trajets convergents dans la plage inférieure des ondes millimétriques. Bien qu'ayant été élaborée pour les applications entre un point fixe et une zone, cette Recommandation peut donner quelques indications générales sur l'amélioration apportée par de tels éléments d'un réseau à diversité d'acheminement (ou maillé) point à point.

En raison de la distribution temporelle et spatiale aléatoire du taux de précipitation, la profondeur des affaiblissements sera différente sur des liaisons point à point convergentes. Par conséquent, il peut y avoir une dégradation du rapport porteuse sur brouillages, C/I , entre des liaisons d'utilisateurs situés dans des secteurs angulaires différents, chaque fois que le signal utile subit sur son trajet un affaiblissement dû à la pluie et que le signal brouilleur ne subit pas d'affaiblissement.

La distribution cumulative de l'affaiblissement différentiel dû à la pluie pour deux liaisons convergentes exploitées sur la même fréquence peut être estimée comme suit (voir la Note 1):

$$A_{12}(p) = [A_1(p) - 0,34 A_2(p)] \left(2,65 |\theta|^{0,23} + 0,004 |\Delta d|^{2,25} \right) f^{-0,4} \quad \text{dB} \quad (35)$$

où:

p : pourcentage de temps compris entre 0,01% et 1%

f : fréquence (GHz)

Δd : différence de longueur de trajet (km)

θ : angle entre les liaisons compris entre 0° et 180° (rad)

$A_1(p)$ et $A_2(p)$: valeurs de l'affaiblissement dû à la pluie sur les différentes liaisons, dépassées pendant $p\%$ du temps et calculées selon la méthode donnée dans la Recommandation UIT-R 530.

NOTE 1 – L'équation (35) est basée sur les résultats de mesures effectuées sur 36 paires de liaisons convergentes pour des fréquences comprises entre 15 et 38 GHz et des longueurs de trajet comprises entre 1 et 23 km.

4.3 Trajets avec répéteurs passifs

À partir des travaux de Karl et Persson [1998], la Recommandation UIT-R P.530 fournit les indications nécessaires pour étendre les procédures à un seul bond au cas des bonds multiples à répéteurs passifs pour des trajets comportant deux tronçons ou plus.

Dans le cas des réflecteurs plans, la procédure est simple: elle consiste à insérer la longueur totale du trajet dans l'équation (32) de la Recommandation en question, équation qui permet de calculer le facteur de réduction de la distance. Cette approche est très précise si les tronçons du bond sont à peu près parallèles. Lorsque l'on s'écarte de cette configuration à tronçons parallèles, l'effet global observé est une augmentation de l'uniformité de la pluie sur l'ensemble du trajet, étant donné que la distance entre les extrémités diminue par rapport à la taille d'une cellule de pluie. Ceci a pour conséquence la sous-estimation de l'affaiblissement du fait de la sous-estimation du facteur de réduction. La Recommandation UIT-R P.530 propose une solution – non testée – pour éliminer à peu près cet effet.

Dans le cas des antennes-relais dos à dos avec polarisations identiques sur les tronçons, la procédure est identique à celle des réflecteurs plans. Dans le cas de polarisations alternantes verticales et horizontales, l'affaiblissement est calculé sur l'ensemble du trajet pour une polarisation puis l'autre. On effectue ensuite une simple moyenne pondérée à partir de la longueur réelle du trajet pour chaque polarisation.

5 Évanouissements par trajets multiples à une seule fréquence

Sur les liaisons analogiques, le seul moyen d'estimer les interruptions de service dues aux évanouissements par trajets multiples est d'utiliser des distributions d'évanouissements par trajets multiples à une seule fréquence ou sur une largeur de bande étroite. Ces distributions sont également une composante essentielle de presque toutes les techniques d'estimation des interruptions sur les liaisons numériques. En outre, les distributions de renforcement dans des conditions de trajets multiples sont un élément important des calculs de brouillages et de saturation des récepteurs (voir le Manuel *Faisceaux hertziens numériques* de l'UIT-R).

Le § 5.1 ci-dessous présente le principe et la précision des méthodes de prévision indiquées dans la Recommandation UIT-R P.530 pour estimer les distributions d'évanouissements et de renforcement à une seule fréquence. Cette présentation est suivie d'exemples concernant des liaisons réelles, qui visent à faciliter l'application de ces méthodes. Si l'on ne dispose pas encore de procédures permettant de prévoir le nombre et la durée des évanouissements en moyenne, des procédures fondées sur des données expérimentales limitées permettent de fournir des valeurs approchées. Ces procédures sont présentées au § 5.2. Le § 5.3 examine les données disponibles sur la vitesse de variation du niveau des signaux. Enfin, le § 5.4 se propose d'étudier les évanouissements par trajets multiples sur les liaisons en cascade.

Du fait du rôle particulier qu'elle joue dans les liaisons radioélectriques numériques, la distorsion liée à la nature sélective en fréquence des évanouissements par trajets multiples fait l'objet d'une étude distincte au § 6. De même, les techniques de diversité, moyens essentiels de diminution de l'apparition des évanouissements par trajets multiples et de la distorsion associée, sont examinées à part au § 8.

5.1 Prévision de la distribution des évanouissements et du renforcement

La Recommandation UIT-R P.530 présente quatre méthodes complémentaires conçues pour prévoir diverses parties de la distribution des évanouissements/du renforcement pour le mois le plus défavorable moyen à un emplacement géographique quelconque dans le monde. Deux méthodes concernent le domaine des évanouissements profonds de la distribution: la méthode 1 destinée à la conception détaillée des liaisons et la méthode 2 pour la planification initiale ou l'octroi d'autorisations. Ces méthodes apportent les bases de calcul pour la méthode par interpolation concernant la gamme des évanouissements peu profonds et pour la méthode concernant la zone de renforcement. Le principe de chacune de ces méthodes est décrit dans les § 5.1.1 à 5.1.3, qui sont assortis d'un résumé des résultats des essais. Le § 5.1.4 présente des exemples mettant en œuvre l'ensemble des méthodes.

5.1.1 Principe et précision des méthodes 1 et 2

5.1.1.1 Détermination de l'ensemble de la distribution à partir de la queue de la distribution

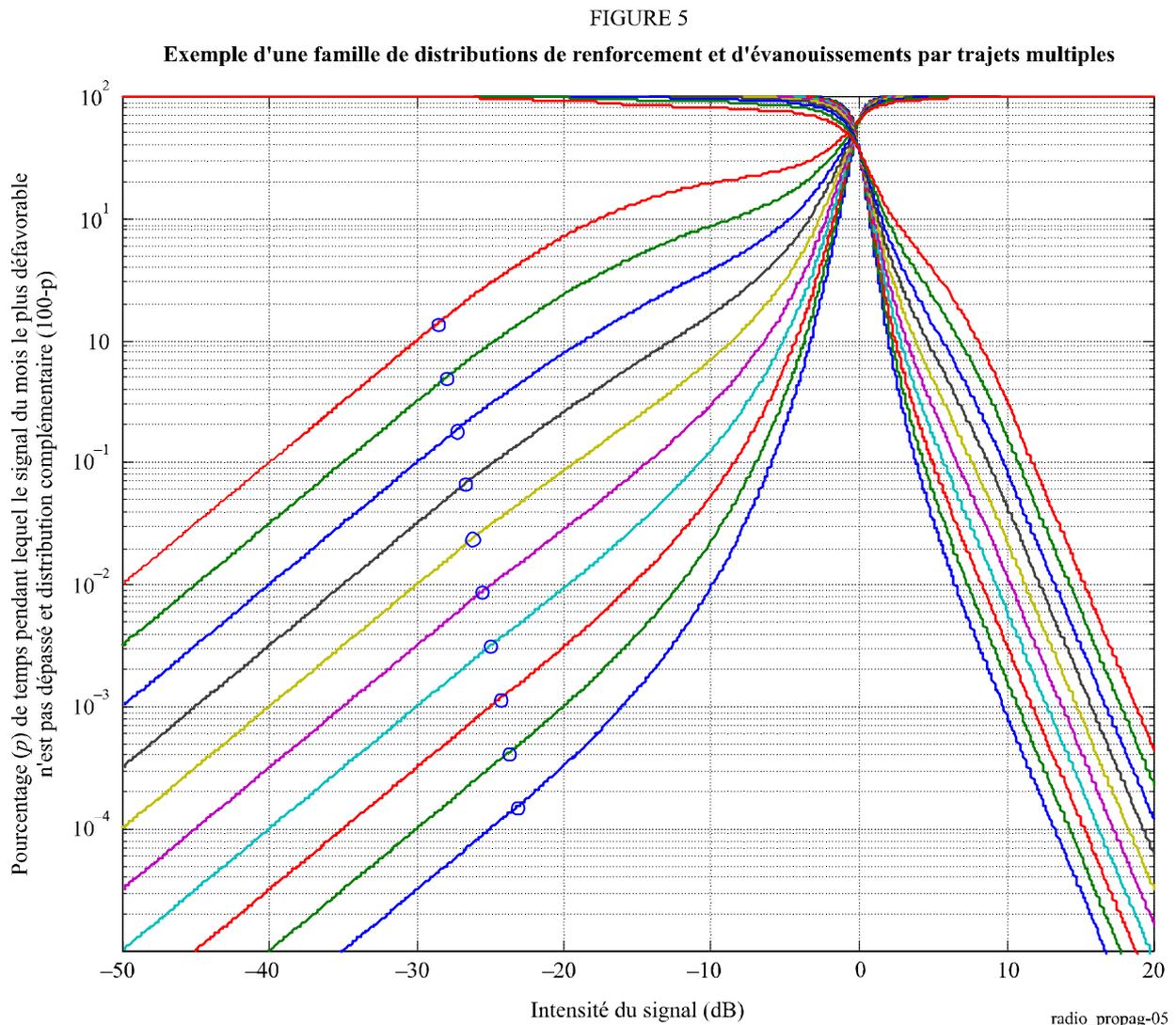
Le signal des évanouissements profonds suit une distribution de Rayleigh. Ce point de vue, admis depuis très longtemps [Pearson, 1965; Morita *et al.*, 1974 et Barnett, 1972], est étayé par des analyses de mesures plus détaillées [Tjelja *et al.*, 1990].

Une démarche courante consiste à faire l'hypothèse que chaque variable de liaison et chaque variable relative au climat/terrain contribuent de façon indépendante au domaine des évanouissements profonds. Le modèle adopté pour décrire la région des évanouissements profonds suit une loi puissance. Dans sa forme générale, la probabilité p_w (souvent exprimée en pourcentage) qu'une profondeur d'évanouissement, A , soit dépassée est donnée par la formule:

$$p_w = \prod_i g_i(x_i) 10^{-A/10} \quad (36)$$

où i est la i ème liaison et où les variables prédictives, x_i et g_i , sont des fonctions de celle-ci. Ces variables sont fréquemment des fonctions exponentielles, dans lesquelles l'exposant fournit une information directe sur l'importance du prédictiveur.

Dès que l'on a trouvé la queue des évanouissements profonds, l'ensemble de la distribution peut être facilement déduit. La Fig. 5 présente une famille de distributions de renforcement et d'évanouissements par trajets multiples. Le petit cercle sur chaque courbe indique l'endroit où se termine la pente de Rayleigh. Entre ce point et le point 0 dB à 67,7%, la distribution est interpolée. Dans la région de renforcement, la distribution suit une pente fixe au-dessus de 10 dB reposant sur des analyses empiriques de données mesurées [Tjelta et Tanem, 1992], et une interpolation entre 0 dB et 10 dB.

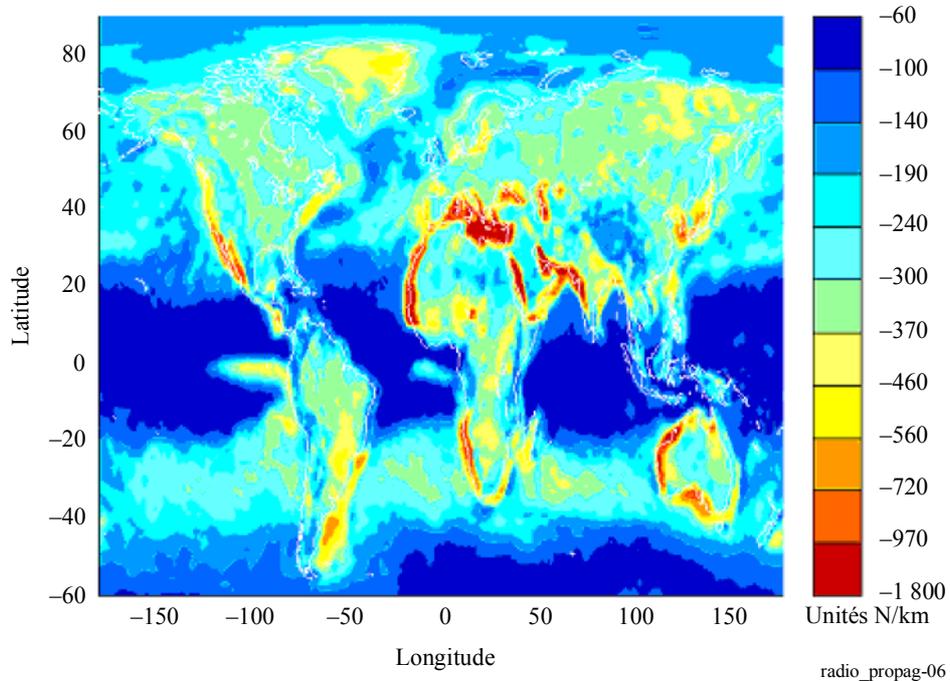


5.1.1.2 Détermination de la queue de la distribution des évanouissements par trajets multiples

La Recommandation UIT-R P.530 présente deux méthodes de l'UIT-R. Dans les deux cas, la méthode est séparée en deux parties: d'une part, la description du climat via un paramètre géoclimatique K et, d'autre part, la prise en compte des variables de liaison. La partie relative au climat repose sur la probabilité de gradients du coïndice de réfraction fortement négatifs dans une zone, la méthode la plus précise prenant en compte la rugosité de la zone. La Fig. 6 présente une carte des gradients du coïndice de réfraction non dépassés pendant 1% d'une année moyenne [Tjelta *et al.*, 1998]. On peut trouver un tableau présentant ces données pour tout emplacement géographique sur la Terre dans la Recommandation UIT-R P.453.

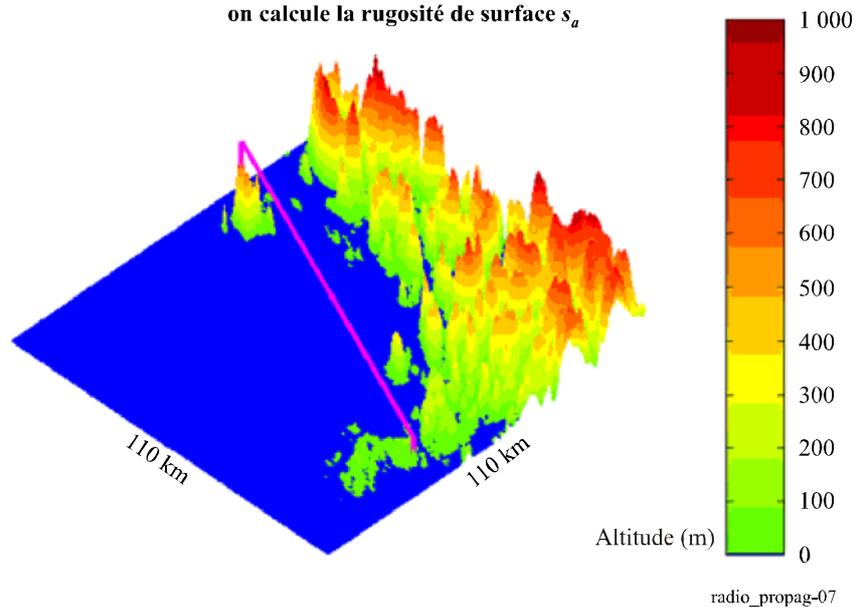
Les spécialistes de la propagation ont étudié et largement adopté des méthodes fondées sur ces principes [Crombie, 1984, Tjelta *et al.*, 1990].

FIGURE 6
**Gradient du coïndice de réfraction négatif pour les 65 m inférieurs
 de l'atmosphère non dépassé pendant 1% d'une année moyenne
 (voir la Recommandation UIT-R P.453)**

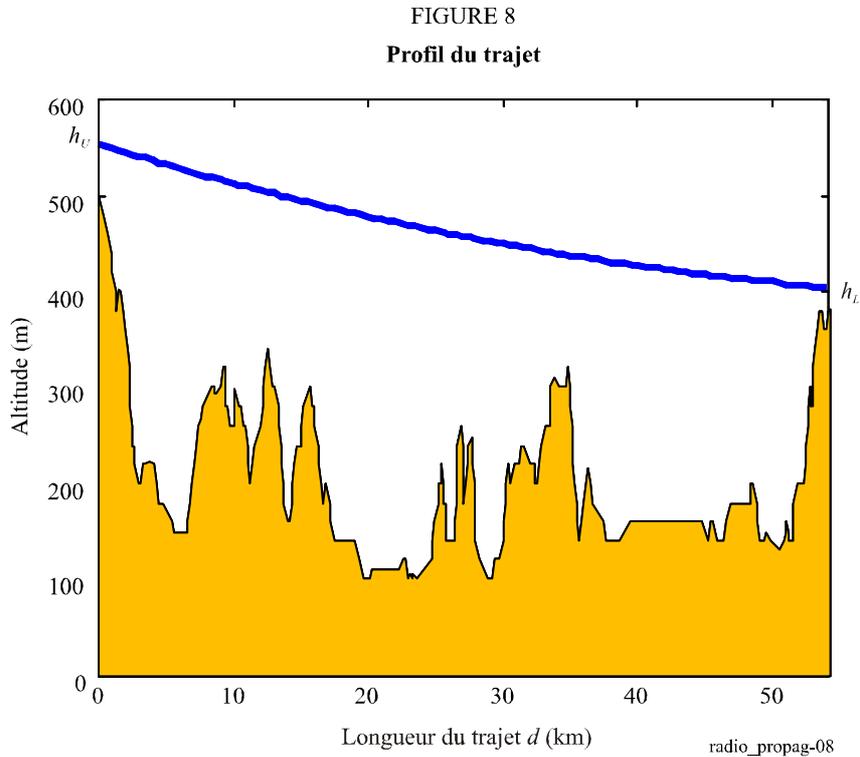


La rugosité du terrain est utilisée dans la méthode la plus précise, qui nécessite la connaissance de données numériques sur une zone de 110 km par 110 km, la liaison étant située dans le milieu de la zone. La rugosité de surface de la zone, s_a , correspond simplement à l'écart type de toutes les hauteurs situées dans le carré.

FIGURE 7
**Exemple d'une surface de 110 km par 110 km pour laquelle
 on calcule la rugosité de surface s_a**



Les méthodes mentionnées utilisent des fonctions légèrement différentes en ce qui concerne les variables de liaison (longueur du trajet d , inclinaison du trajet ε_p , hauteur de l'antenne inférieure h_L et fréquence f). La Fig. 8 illustre un profil de trajet pour une Terre plate. La longueur du trajet et la hauteur des antennes permettant de déduire l'inclinaison du trajet sont indiquées; la hauteur de l'antenne inférieure et la longueur du trajet sont mises en relief.



La méthodologie de base qui a permis de déduire les équations empiriques des méthodes 1 et 2 pour le pourcentage de temps p pendant lequel la profondeur d'évanouissement A est dépassée repose sur une technique d'analyse par régressions multiples sur des données d'évanouissement mesurées sur 47 trajets en Europe du nord-ouest [Tjelta *et al.* 1990]. Une approche ultérieure utilisant des cartes de statistiques du gradient du coïndice de réfraction est en fait une généralisation, à l'échelle mondiale, d'une approche initialement élaborée pour le Canada [Olsen et Segal, 1992]. On trouve dans [Olsen et Tjelta, 1999 et Olsen *et al.*, 2003] les principes de base des nouvelles méthodes de l'UIT-R ainsi qu'une analyse approfondie des méthodes régionales fréquemment utilisées. Les données relatives au gradient du coïndice de réfraction, nécessaires pour déterminer les facteurs géoclimatiques utilisés dans les méthodes 1 et 2, ont été obtenues à partir de données atmosphériques sous forme numérique figurant dans [Tjelta *et al.*, 1998]. Ce même article fournit la méthode systématique de régression et de corrélation permettant de déterminer les prédicteurs. Les coefficients utilisés dans la Recommandation UIT-R P.530 proviennent de diverses contributions apportées à l'UIT-R.

Étant donné qu'elles ne laissent pas l'utilisateur décider de la classification de façon manuelle ou subjective, ces méthodes sont aujourd'hui très faciles à implanter dans des logiciels. De toute évidence, même si les anciennes méthodes donnaient des résultats précis (à condition d'être mises en œuvre par un utilisateur expérimenté), la méthode de la Recommandation UIT-R P.530 est aujourd'hui plus indiquée, du fait de l'utilisation croissante des outils informatiques.

5.1.1.3 Précision de la méthode de détermination de la queue de la distribution des évanouissements profonds

La longueur du trajet, d , et l'inclinaison du trajet, ε_p , sont de bons prédicteurs pour la simple raison que plus la liaison est longue, plus il y a de chances qu'elle rencontre des structures de conduit. De même, plus le trajet est incliné, moins il y a de risque qu'il soit perturbé par les structures classiques en couches horizontales des conduits. Il semble raisonnable, pour décrire ce phénomène, de prendre la hauteur de l'antenne inférieure comme prédicteur, façon de désigner les couches au sol comme cause principale du renforcement et des évanouissements par trajets multiples. Plus l'antenne est basse, plus il y a de chances que le trajet se situe dans des conduits. Il est plus difficile de trouver une explication pour le terme relatif à la fréquence, mais il paraît raisonnable d'indiquer qu'il est un prédicteur assez faible dans les équations obtenues par régressions multiples. À noter cependant que la corrélation entre les variables peut masquer de véritables dépendances, notamment la corrélation négative évidente entre les longueurs de trajet et la fréquence.

Les écarts types globaux des erreurs de prévision obtenus en utilisant les méthodes 1 et 2 sont respectivement de 5,7 dB et 5,9 dB (y compris la contribution due aux variations d'une année sur l'autre). Parmi le large éventail de trajets inclus dans ces chiffres, un écart type minimal d'erreur de 5,2 dB s'applique aux trajets terrestres pour lesquels $h_L < 700$ m, et un écart type maximal de 7,3 dB pour les trajets au-dessus de l'eau. Toutefois, la faible différence entre les écarts types globaux ne reflète pas avec exactitude l'amélioration des prévisions qu'il est possible d'obtenir en utilisant la méthode 1 pour des liaisons sur des terrains très accidentés (montagnes, etc.) ou des surfaces très lisses (trajets au-dessus de l'eau, etc.). Par exemple, les écarts types d'erreur pour des liaisons montagneuses ($h_L > 700$ m) sont diminués de 0,6 dB, et les erreurs individuelles pour des liaisons passant au-dessus de zones montagneuses très élevées de plusieurs décibels.

Les méthodes 1 et 2 découlent de multiples régressions sur des données d'évanouissement pour 251 liaisons dans diverses zones géoclimatiques du monde avec des longueurs de trajet d comprises entre 7,5 et 185 km, des fréquences f entre 450 MHz et 37 GHz, des inclinaisons de trajet $|\varepsilon_p|$ jusqu'à 37 mrad, des altitudes d'antenne inférieure h_L allant de 17 à 2300 m, des gradients du coïndice dN_1 compris entre -860 et -150 unités N/km et des rugosités de surface s_a allant de 6 à 850 m (si $s_a < 1$ m, on utilise une limite inférieure de 1 m). Les résultats d'une analyse semi-empirique indiquent que la limite de validité de la fréquence inférieure est inversement proportionnelle à la longueur de trajet.

5.1.2 Principe et précision de la méthode de détermination des évanouissements peu profonds

La méthode indiquée dans la Recommandation UIT-R P.530 pour prévoir les profondeurs des évanouissements dépassés pendant différents pourcentages du temps combine, d'une part, une interpolation empirique entre la zone des évanouissements profonds de la distribution et 0 dB et, d'autre part, les méthodes 1 et 2 examinées au paragraphe précédent. La méthode est partiellement fondée sur un ajustement de données dans la plage de longueurs de trajet comprises entre 7 et 95 km et la gamme de fréquences allant de 2 à 37 GHz.

Cela étant, la méthode s'applique aussi éventuellement aux gammes plus étendues préconisées pour les méthodes 1 et 2 du paragraphe précédent.

Toutes les données figurant dans le Tableau I-2 de la base de données de l'UIT-R sont utilisées, c'est-à-dire toutes les données contenant les variables nécessaires aux méthodes de prévision. Le Tableau 1 présente une synthèse des résultats des essais de la méthode de prévision préconisée dans la Recommandation UIT-R P.530 pour déterminer la distribution des évanouissements par trajets multiples pour le mois le plus défavorable, lorsque les données observées subissent un évanouissement inférieur à 20 dB. À 10%, toutes les données disponibles présentent un évanouissement inférieur à 20 dB; à 1%, presque toutes. Cependant, à 0,1%, la moitié des données concernant le mois le plus défavorable subit un évanouissement inférieur à 20 dB; à 0,01%, seulement quelques données; à 0,001%, aucune. Les essais montrent des erreurs moyennes et des écarts types des erreurs raisonnablement bas pour des pourcentages supérieurs ou égaux à 0,1%.

TABLEAU 1

**Essais utilisant les données observées d'évanouissements peu profonds inférieurs à 20 dB
pour le mois le plus défavorable**

Pourcentage du temps	Nombre d'observations	Erreur moyenne (dB)		Écart type (dB)	
		Méthode 1	Méthode 2	Méthode 1	Méthode 2
10	11	-1,0	-1,0	1,7	1,7
1	49	-1,2	-1,4	1,6	1,7
0,1	63	-0,2	-0,48	4,1	3,9
0,01	9	5,4	5,3	2,9	2,9

5.1.3 Principe et précision de la méthode utilisée pour la zone de renforcement

La méthode de détermination du renforcement repose sur une analyse de données figurant dans [Tjelta et Tanem, 1992] et sur l'hypothèse selon laquelle les mêmes couches atmosphériques ou structures de conduit à l'origine d'évanouissements profonds peuvent également provoquer d'importants renforcements. Ainsi une liaison présentant de forts évanouissements par trajets multiples se caractérise-t-elle également par de très forts renforcements. Peu de données étant disponibles, il est simplement effectué un ajustement pour mettre en relation le renforcement et la queue des évanouissements par trajets multiples. D'après les exemples disponibles dans la littérature scientifique, la pente de la queue lourde de la distribution de renforcement serait d'environ 3,5 dB par décade. Les données semblent indiquer une pente fixe à partir du niveau de renforcement 10 dB. Entre 10 dB et 0 dB, une interpolation analogue à celle des évanouissements par trajets multiples est effectuée.

Les pourcentages compris entre 90% et 99,999% correspondent à des dépassements de renforcement pendant 10% à 0,001% du temps. Les données utilisées sont celles pour lesquelles une prévision est possible.

TABLEAU 2

Résultats des essais des méthodes de prévision pour le renforcement le plus défavorable

Pourcentage du temps	Nombre d'observations	Erreur moyenne (dB)		Écart type (dB)	
		Méthode 1	Méthode 1	Méthode 1	Méthode 2
99,999	4	-0,8	-0,6	2,8	2,7
99,99	8	-0,2	-0,1	3,1	3,0
99,9	10	-0,9	-0,8	1,8	1,8
99	10	-0,6	-0,6	2,0	2,0
90	3	-1,4	-1,4	0,8	0,8

Les résultats indiquent des moyennes et des écarts types faibles pour les deux méthodes, mais il convient de noter le nombre peu élevé de données.

5.1.4 Exemples d'application

Lieu: Athènes, Grèce

Latitude: 38° 50' N

Longitude: 23° 40' E

Fréquence: $f = 6$ GHz

Longueur du trajet: $d = 60$ km

Hauteur de l'antenne d'émission: $h_t = 45$ m

Hauteur de l'antenne de réception: $h_r = 30$ m

Étape 1: Pour cette position du trajet, la valeur du gradient du coïndice de réfraction au point considéré dans les 65 m inférieurs de l'atmosphère, non dépassée pendant 1% d'une année moyenne, est de $-594,75$ unités N/km. Ce résultat est obtenu en appliquant la grille de résolution $1,5^\circ$ en latitude et longitude de la Recommandation UIT-R P.453.

Étape 2: Le facteur géoclimatique K pour le mois le plus défavorable moyen est ensuite déterminé. Pour ce faire, on effectue le calcul rapide suivant:

$$K = 10^{-4,2 - 0,0029 d N_1} = 0,00335 \quad (37)$$

Étape 3: L'équation simplifiée correspondante est utilisée pour le calcul du facteur d'occurrence de trajets multiples:

$$p_0 = K d^{3,0} (1 + |\varepsilon_p|)^{-1,2} \times 10^{0,033 f - 0,001 h_L} = 814,57\% \quad (38)$$

où:

h_e et h_r : hauteur des antennes (m) (au-dessus du niveau de la mer)

$$|\varepsilon_p| = |h_r - h_e| / d$$

h_L : altitude de l'antenne inférieure

Étape 4: La profondeur de transition d'évanouissement, A_t , c'est-à-dire la valeur à laquelle se produit la transition entre la distribution des évanouissements profonds et celle des évanouissements peu profonds, est donnée par:

$$A_t = 25 + 1,2 \log p_0 = 28,49 \quad \text{dB} \quad (39)$$

Étape 5: Le Tableau 3 présente le pourcentage du temps, p_w , pendant lequel différentes profondeurs d'évanouissements, A (dB), sont dépassées pendant le mois le plus défavorable moyen.

TABLEAU 3

Pourcentage de dépassement des niveaux de profondeur d'évanouissements

Profondeur d'évanouissements A (dB)	Pourcentage de dépassement p_w (%)
2	36,054
5	23,246
10	16,986
30	0,815

5.2 Statistiques sur le nombre et la durée des évanouissements

La planification et la conception des faisceaux hertziens reposent sur des exigences de disponibilité et de qualité de fonctionnement.

Un signal est dit «non disponible» si sa qualité est inférieure à un seuil donné (par exemple $TEB \geq 10^{-3}$ pour un faisceau numérique) pendant 10 secondes consécutives ou plus, et/ou s'il est totalement interrompu.

Pour prévoir la probabilité de non-disponibilité d'un faisceau hertzien, il est donc nécessaire de connaître les statistiques sur le nombre et la durée des évanouissements.

En outre, ces statistiques (comme les statistiques du taux de variation des évanouissements) jouent un rôle très important dans la conception des systèmes de commutation de protection destinés aux faisceaux hertziens.

5.2.1 Procédures d'estimation

Pour des profondeurs d'évanouissement, A , supérieures à 15 dB environ, le nombre moyen d'évanouissements par heure, N , et la durée moyenne des évanouissements, t , à la fréquence, f , sont approchés par les formules suivantes:

$$N = C_1 10^{-\alpha_1 A f \beta_1} \tag{40}$$

et

$$t = C_1 10^{-\alpha_2 A f \beta_2} \tag{41}$$

TABLEAU 4

Coefficients des équations (40) et (41) déterminés de façon expérimentale

Lieu	α_1	α_2	β_1	β_2	$\beta_1 + \beta_2$	C_1	C_2
France	0,5	0,5	1,4	-1	0,4	-	-
Danemark	0,67	0,33	-	-	-	$\sim 0,7^{(1)}$	-
États-Unis	0,5	0,5	1,32	-0,50	0,82	-	$56,6 \sqrt{d}$
Suisse	0,41	0,59	1,38	-1,38	0	-	-

⁽¹⁾ En posant l'hypothèse: $\beta_1 = 1,4$

Il n'est pas encore possible de fournir un ensemble de règles générales pour déterminer les paramètres des équations (40) et (41), mais les valeurs du Tableau 4, déterminées de façon expérimentale par plusieurs pays pour des trajets terrestres, peuvent être utilisées à titre indicatif.

5.2.2 Principe expérimental des procédures d'estimation

Plusieurs pays ont effectué des mesures du nombre moyen et de la durée moyenne des évanouissements à des fréquences comprises entre 4 et 15 GHz [Boithias, 1981]. Les équations (40) et (41) reposent sur des données relatives à des trajets terrestres, qui ont été relevées en France [Boithias, 1981], au Danemark [Stephansen et Mogensen, 1979], aux États-Unis [Lin, 1971; Vigants, 1971; Bullington, 1971 et Barnett, 1972] et en Suisse. Les constantes de proportionnalité, C_1 et C_2 , dépendent de la période considérée, de la longueur du trajet, du climat, etc. Ces dépendances ne sont à ce jour pas précisément connues, mais certains éléments amènent à conclure que N (et donc C_1) tend à augmenter avec la longueur du trajet. Des mesures effectuées en ex-URSS semblent indiquer que t décroît avec la longueur et le dégagement du trajet.

Dans chacun des cas présentés dans le tableau précédent, la somme des exposants α_1 et α_2 est égale à 1, étant donné que le produit $N \cdot t$ représente la durée totale des évanouissements, qui, pour des évanouissements profonds, est proportionnelle à la puissance reçue.

On a observé que la distribution des durées d'évanouissements, dont la valeur moyenne est donnée par l'équation (41), suit une loi log-normale [Boithias, 1981]. On a de plus noté que l'écart type des durées d'évanouissements diminue avec la profondeur d'évanouissement pour des fréquences comprises entre 13,5 et 15 GHz et augmente légèrement avec la fréquence [Nadenenko et Sviatogor, 1972 et Stephansen et Mogensen, 1979]. Cet écart type semble ne dépendre que légèrement des caractéristiques géométriques du trajet et des conditions climatiques [Nadenenko et Sviatogor, 1972].

On a observé que, sur des trajets suffisamment plats, le nombre d'évanouissements par trajets multiples augmente avec le dégagement du trajet. On a aussi noté que le nombre d'évanouissements sur les trajets côtiers était sensiblement plus élevé que sur les trajets au-dessus des terres. Par exemple, le nombre d'évanouissements par trajets multiples mesurés sur des trajets maritimes était 5 à 10 fois plus élevé que sur des trajets terrestres, avec une zone plate dans le voisinage du point de réflexion au sol [Nadenenko et Sviatogor, 1972].

Des mesures effectuées sur un trajet maritime de 22 km au large des côtes occidentales françaises font apparaître une diminution de la valeur médiane de la durée des évanouissements ainsi qu'une diminution de l'écart type lorsque la fréquence augmente de 2 à 15 GHz.

5.3 Vitesse de variation du niveau du signal

La vitesse de variation du niveau du signal a été mesurée de deux manières différentes: variation du niveau du signal pendant un intervalle de temps donné ou intervalle de temps associé à une légère variation donnée du niveau. En général, les quelques données expérimentales disponibles montrent que cette vitesse augmente avec la fréquence et avec la profondeur des évanouissements (ce qui est cohérent avec le comportement de t dans l'équation (41)) et augmente avec la longueur du trajet.

Des mesures effectuées pendant une année sur une liaison terrestre de 53 km en France fonctionnant à 13 GHz montrent que les vitesses de variation du niveau du signal se caractérisent par des distributions log-normales avec le même écart type pour des profondeurs d'évanouissements moyennes de 20 et 30 dB, les mesures étant effectuées par intervalles de 10 dB. Les valeurs médianes étaient de 5 dB/s autour de 20 dB, et de 20 dB/s autour de 30 dB. Le ratio des vitesses de variation sur un intervalle d'écart type était de 5,4 [Derrennes, 1979].

Toujours en France, on a observé sur un trajet terrestre de 53 km que les vitesses de variation du niveau du signal, à quatre fréquences fixes situées entre 11,25 GHz et 11,65 GHz, présentaient approximativement des distributions log-normales pour des profondeurs d'évanouissement dépassant 12 dB. Les vitesses de variation dépassées dans 0,1% des cas se situaient au-dessus de 100 dB/s. Le ratio des vitesses de variation sur un intervalle d'écart type était de 2,7 environ [Martin, 1983].

Sur un trajet maritime en ex-URSS, on a mesuré, avec des intervalles de 10 dB, des vitesses d'évanouissement de 5 dB/s à 2 GHz et des vitesses supérieures à 100 dB/s à 15 GHz [Gavzilina *et al.*, 1986].

5.4 Trajets courts

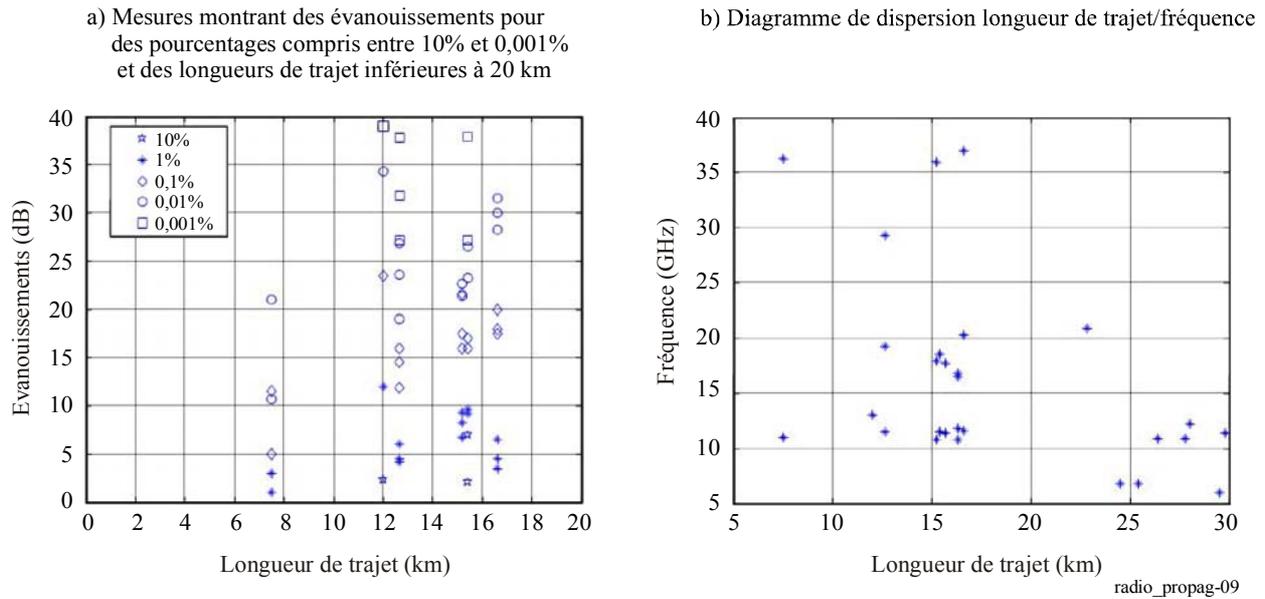
Certaines mesures indiquent des évanouissements importants même pour de courts trajets de 10 km. Au-dessous de 7 km, aucune donnée d'évanouissement par trajets multiples n'a été recensée, mais on peut noter, dans la Fig. 9a), à environ 7 km, des évanouissements de 20 dB pendant 0,01% du temps. Il semble que l'on puisse observer quelques évanouissements par trajets multiples à des longueurs de trajet encore plus courtes. Les mécanismes de conduit, pour leur part, ne semblent pas produire d'évanouissements profonds sur les trajets très courts.

5.5 Courtes périodes de temps

Les méthodes de prévision concernant le renforcement et les évanouissements par trajets multiples et leurs mécanismes afférents indiquées dans la Recommandation UIT-R P.530 reposent sur des statistiques de mesures de propagation à long terme et sont bien adaptées à la planification des liaisons hertziennes en visibilité directe.

Cela étant, les méthodes de prévision des indicateurs de fiabilité et de qualité de fonctionnement sur de courts intervalles de temps jouent également un rôle important, notamment lorsqu'il s'agit de mettre en service une liaison conformément à la Recommandation UIT-R F.1330. Étant donné que les informations disponibles sur les mesures des évanouissements sur de courtes durées sont limitées à certaines régions du globe, la Recommandation UIT-R P.530 ne fournit que des orientations générales à ce sujet.

FIGURE 9



Les études publiées les plus détaillées ont été menées dans la gamme de fréquences 3,7-8 GHz sur 25 bonds de faisceaux hertziens de longueur comprise entre 36,3 et 166,3 km, situés dans différentes régions climatiques du centre, du nord-ouest et du sud de la partie européenne de la Russie, de la côte baltique, de l'Ukraine, du Bélarus, de la Crimée et de la côte de la mer Noire bordant le Caucase [Minkin et Nadenenko, 1998]. Les statistiques d'évanouissement sur de courtes périodes de temps (15 min, 1 h, 3 h, 6 h, 1 jour, 4 jours et 7 jours) ont été obtenues en analysant des enregistrements continus du niveau du signal, effectués 24 heures sur 24 pendant les mois d'été. Au total, 23 000 h de données expérimentales concernant de courtes périodes d'essai ont été traitées.

À partir de ces résultats, pour les régions du monde en question, les équations empiriques suivantes ont été proposées. Elles visent à convertir les distributions d'évanouissement pour le mois le plus défavorable en distributions pour des périodes de temps plus courtes.

Pour des trajets relativement plats:

$$p_{sw} = p_w \cdot \left(89,34T^{-0,854} + 0,676 \right) \% \quad \text{pour } 1 \text{ h} \leq T \leq 720 \text{ h} \quad (42)$$

Pour des trajets accidentés le long des côtes:

$$p_{sw} = p_w \cdot \left(119T^{-0,78} + 0,295 \right) \% \quad \text{pour } 1 \text{ h} \leq T \leq 720 \text{ h} \quad (43)$$

Pour des trajets accidentés au-dessus des surfaces émergées:

$$p_{sw} = p_w \cdot \left(119,85T^{-0,834} + 0,175 \right) \% \quad \text{pour } 1 \text{ h} \leq T \leq 720 \text{ h} \quad (44)$$

5.6 Liaisons en cascade

Comme dans le cas de l'affaiblissement dû à la pluie, on considère que la corrélation entre les évanouissements profonds des différents bonds d'une liaison en cascade est en général négligeable. Dans ces conditions, la probabilité totale d'interruption pour une série en cascade est égale à la somme des probabilités d'interruption sur chacune des liaisons:

$$P_T = \sum_{i=1}^n P_i \quad (45)$$

où P_i est la probabilité d'interruption relative au i ème trajet sur un total de n .

Des mesures effectuées au Japon sur cinq liaisons consécutives ont montré que la probabilité simultanée d'apparition d'une profondeur d'évanouissement donnée pour deux liaisons consécutives était toujours inférieure à 10% de la probabilité sur chacune des liaisons. Des mesures effectuées sur 18 paires de bonds adjacents au Brésil [Silva Mello *et. al.*, 2005] montrent une corrélation supérieure sous les climats tropicaux et équatoriaux. Les résultats des études indiquent une forte corrélation entre la valeur d'affaiblissement dans la distribution conjointe et la valeur d'affaiblissement, plus petite, dans la distribution des liaisons prises individuellement, et ce pour le même pourcentage de temps.

6 Distorsion due aux effets de la propagation

La cause essentielle de la distorsion dans les liaisons en visibilité directe en ondes décimétriques et centimétriques réside dans la dépendance de l'amplitude et du temps de propagation de groupe par rapport à la fréquence pendant les conditions de trajets multiples par temps clair. Cette distorsion, généralement appelée évanouissement sélectif en fréquence, augmente avec la largeur de bande du faisceau et dépend de l'amplitude et du temps de propagation relatif de chaque trajet entre l'émetteur et le récepteur. La distorsion due aux trajets multiples a toutes les chances d'être le facteur limitatif sur les liaisons hertziennes numériques à capacité élevée dans le cas des systèmes fonctionnant à des fréquences inférieures à 15 GHz environ. À des fréquences plus élevées, les effets de la distorsion due à la propagation doivent également être pris en compte, sans oublier toutefois qu'en règle générale, les effets dus aux précipitations sont beaucoup plus importants. Le présent chapitre décrit les effets dus à la distorsion ainsi que les modèles de canaux permettant d'estimer la qualité de fonctionnement d'un faisceau en présence d'évanouissements sélectifs en fréquence. Pour pallier ces effets, il convient d'utiliser les techniques décrites dans les autres parties du présent Manuel.

6.1 Modèles de propagation par trajets multiples

Toute méthode de prévision de la qualité de fonctionnement en présence de propagation par trajets multiples (TM) consiste en:

- un modèle de description des TM;
- un modèle pour les statistiques de probabilité d'apparition des TM;
- un modèle décrivant comment les équipements résistent aux TM.

La propagation par trajets multiples est généralement représentée sous la forme de deux rayons discrets ou plus, décrits par leur amplitude et leur temps de propagation, qui se combinent au niveau du récepteur. Le nombre de rayons est certes parfois élevé, mais il convient surtout de noter qu'un évanouissement profond se produit lorsque deux rayons d'amplitude comparable s'additionnent de façon destructive. Ainsi, il se peut très bien que l'évanouissement profond (et l'évanouissement sélectif en fréquence) se produise, dans des conditions normales, lorsqu'un seul rayon, arrivant avec un délai de propagation particulier, s'additionne à un ou plusieurs autres rayons arrivés plus tôt.

La fonction de transfert complexe du canal RF pour un modèle physique à rayons multiples est donnée par la relation:

$$H(\omega) = \sum_{i=1}^N A_i e^{-j(\omega T_i + \varphi_i)} \quad (46)$$

où:

$$\omega = 2\pi f$$

A_i , T_i et φ_i : amplitude, temps de propagation et phase du $i^{\text{ème}}$ rayon.

Pour représenter un canal RF à bande limitée (40-100 MHz), on peut utiliser des modèles mathématiques plus simples. Ces modèles de rayons se classent en deux catégories: modèle *polynômial* et modèle *fictif*.

6.1.1 Modèles fictifs de rayons

La fonction de transfert par trajets multiples peut être décrite à l'aide de différents modèles mettant en jeu un nombre limité de rayons. Du fait des simplifications envisagées dans l'expression de la fonction de transfert, ces modèles ne correspondent pas à une réalité physique: on les appelle des modèles fictifs de rayons.

Le modèle simplifié à trois rayons, également appelé modèle de Rummler [Rummler, 1978], est donné par la formule:

$$H(\omega) = a \left(1 - b e^{\pm j(\omega - \omega_M)\tau_f} \right) \quad (47)$$

Ce modèle comporte quatre paramètres: a et b sont les coefficients correspondant respectivement à l'amplitude et à la forme de l'évanouissement sélectif, τ est le temps de propagation du deuxième rayon fictif et ω la fréquence angulaire de la profondeur d'évanouissement maximale. Le nombre de paramètres est souvent ramené à trois, en fixant le temps de propagation à une valeur constante, habituellement $\tau = 6,3$ ns.

Lorsque le nombre de paramètres est ramené à deux, b et ω , en fixant $a = 1$, le modèle est appelé modèle normalisé à deux rayons.

6.1.2 Modèles polynômiaux

Pour représenter la fonction de transfert, on peut utiliser des polynômes réels et des polynômes complexes. L'expression polynômiale de l'amplitude et du temps de propagation de groupe est une fonction de la fréquence, de forme générale:

$$H(\omega) = \sum_{k=0}^N C_k \omega^k \quad (48)$$

où les coefficients C_k peuvent être réels ou complexes.

6.1.3 Modèles paramétriques

Une autre approche consiste à décrire la distorsion des canaux hertziens à l'aide d'une représentation paramétrique de la différence d'amplitude. Les différences d'amplitude à deux fréquences discrètes sont utilisées pour caractériser la distorsion d'amplitude. Cette méthode est généralement appelée distorsion linéaire d'amplitude (LAD). On peut également utiliser deux fréquences fixes, de préférence à égale distance du centre du canal hertzien. On parle alors de dispersion d'amplitude dans la bande (IBAD). Autre solution, les deux fréquences correspondent aux points d'affaiblissement minimum et maximum par rapport au niveau en espace libre. Cette méthode est appelée dispersion énergétique dans la bande (IBPD).

6.2 Calcul de la qualité de fonctionnement

La méthode classique de calcul des temps d'interruption pour des faisceaux analogiques repose sur la notion d'évanouissements à une seule fréquence: elle n'est donc pas directement applicable aux faisceaux hertziens numériques à capacité élevée. Une augmentation de la marge de protection contre les évanouissements qui, dans les faisceaux hertziens analogiques, tend à réduire l'effet du bruit thermique, n'améliore pas le fonctionnement des faisceaux hertziens numériques si un évanouissement sélectif en fréquence a déjà ramené l'amplitude du diagramme de l'œil à zéro.

Pour employer des modèles de propagation dans les calculs de qualité de fonctionnement pour les faisceaux numériques à capacité élevée, il faut disposer des descriptions statistiques du comportement de l'ensemble des paramètres pendant les évanouissements par trajets multiples. On peut diviser ce problème en deux parties: d'une part, la caractérisation de la nature des fluctuations aléatoires dans le modèle de la fonction de transfert par trajets multiples, sous la forme, dans le cas idéal, d'une distribution de probabilité conjointe multidimensionnelle; d'autre part, une description de la façon dont les paramètres de cette distribution

dépendent des propriétés physiques du trajet hertzien (longueur du trajet, radiofréquence, inclinaison du trajet, climat, etc.).

Combinées aux statistiques de probabilité d'apparition des évanouissements, ces informations permettent d'obtenir une distribution de probabilité conjointe inconditionnelle pour les paramètres qui déterminent le comportement du faisceau. L'ensemble complet des paramètres d'un modèle de trajets multiples peut être vu comme les dimensions d'une surface multidimensionnelle. Une interruption de service survient lorsque ces paramètres se trouvent dans une certaine région critique de la surface multidimensionnelle.

Les interruptions de service d'un faisceau hertzien numérique peuvent être prévues à l'aide de différentes méthodes, notamment:

- les méthodes de la marge de protection contre les évanouissements;
- les méthodes des courbes de signature;
- les méthodes utilisant des statistiques LAD.

6.2.1 Méthodes des courbes de signature

La méthode des courbes de signature n'est pas une méthode unique: il en existe différentes approches. On présente ci-après les principes généraux de la méthode, illustrés de quelques exemples de solutions. Pour de plus amples informations, le lecteur pourra consulter le Manuel *Faisceaux hertziens numériques* de l'UIT-R.

La probabilité d'interruption de service ($TEB > 10^{-3}$) due aux évanouissements par trajets multiples (P) peut se calculer à partir de la probabilité d'interruption due aux évanouissements sélectifs en fréquence (P_s) et à la probabilité d'interruption due au bruit thermique (P_f) grâce à la formule suivante:

$$P = \left(P_f^{\alpha/2} + P_s^{\alpha/2} \right)^{2/\alpha} \quad (49)$$

Le calcul de P_f est indiqué dans la Recommandation UIT-R P.530.

La probabilité d'interruption due aux évanouissements sélectifs en fréquence s'exprime comme le produit de la probabilité des évanouissements par trajets multiples η et de la probabilité d'interruption imputable aux brouillages intersymboles pendant les évanouissements par trajets multiples:

$$P_S = \eta \cdot (P_S|_{MP}) \quad (50)$$

La probabilité des évanouissements dus à la propagation par trajets multiples, η , s'exprime en fonction du facteur d'occurrence des évanouissements profonds, P_0 , ou en fonction des paramètres de la distribution statistique des évanouissements lents concomitants. L'équation suivante a été proposée:

$$\eta = 1 - e^{-0,2 P_0^{3/4}} \quad (51)$$

Le dernier terme peut reposer sur le modèle simplifié à trois rayons ou sur le modèle à deux rayons. La probabilité d'interruption est obtenue en intégrant, sur la région critique dans l'espace de probabilité, la fonction de distribution de densité conjointe des variables aléatoires définies par le modèle de canal. Pour effectuer ce calcul, il est nécessaire de faire des hypothèses sur les distributions de probabilité des différents paramètres, notamment le temps de propagation relatif de l'écho τ , l'amplitude relative de l'écho k et la fréquence de coupure ϕ_0 . L'équation suivante est une façon courante de décrire l'interruption de service:

$$P_S|_{MP} = \int_0^{\infty} p(\tau) d\tau \int_{-1/2\pi}^{1/2\pi} \phi_0 d\phi \int_D p(k) dk \quad (52)$$

où D est la région d'interruption définie par les signatures de phase minimale et maximale. En utilisant des signatures approchées, on obtient, après intégration, l'équation suivante:

$$P_S|_{MP} = \frac{C \cdot W \cdot \lambda_a \cdot \{\tau^2\} \cdot P_b(1)}{\tau_r} \quad (53)$$

où:

C : facteur constant

W : largeur de la signature (MHz)

λ_a : hauteur critique moyenne de la signature

τ_r : temps de propagation de référence pour λ_a (ns)

$P_b(1)$: valeur de la fonction de densité de probabilité correspondant à l'amplitude $b = 1$

$\{\tau^2\}$: moment du deuxième ordre de la distribution du temps de propagation relative de l'écho ($= 2\tau_m^2$) pour une distribution exponentielle et $= \mu^2 + \nu^2$ pour une distribution gaussienne

τ_m : temps de propagation moyen du trajet, qui est fonction de la longueur du trajet et du diagramme de rayonnement de l'antenne.

La fdp relative de l'écho, $P_b(b)$, a donné lieu à plusieurs hypothèses: distribution uniforme, distribution exponentielle [Saleh et Valenzuela, 1987], distribution de Weibull [Salous et Bajj, 1998] et distribution de Rayleigh-sur-Rayleigh [Shafi, 1987]. La fdp de la fréquence minimale, $P_{f_0}(f_0)$, est uniforme.

Deux distributions différentes du temps de propagation de l'écho sont envisagées pour $p(\tau)$. Dans le premier cas, le temps de propagation de l'écho τ suit une distribution exponentielle négative de valeur moyenne τ_m , qui dépend de la longueur du trajet. Pour des trajets ne présentant pas de réflexion surfacique importante, on utilise la relation empirique suivante entre τ_m (ns) et d (km):

$$\tau_m = \tau_{m0} \cdot \left(\frac{d}{50} \right)^n \quad (54)$$

où n est compris entre 1,3 et 1,5, et τ_{m0} est le temps de propagation relatif moyen pour un trajet standard de 50 km.

Dans le second cas, on prend l'hypothèse d'une distribution gaussienne de moyenne μ et de variance ν^2 . Ces paramètres peuvent être choisis indépendamment, ce qui permet une meilleure adaptation aux fonctions de densité mesurées (ou calculées) pour chaque bond que ne le permet le seul paramètre de la fonction de densité exponentielle. En l'absence d'informations spécifiques concernant les bonds, le modèle repose sur l'hypothèse suivante:

$$\mu = 0,70 (d/50) \text{ ns} \quad (55)$$

$$\nu^2 = 0,49 (d/50) \text{ ns}^2 \quad (56)$$

La distribution gaussienne inclut des temps de propagation positifs et négatifs.

On peut obtenir une valeur approchée de l'interruption de service due aux évanouissements sélectifs en fréquence en utilisant une approximation rectangulaire de la signature. On utilise alors l'équation suivante:

$$P_S|_{MP} = \frac{C \cdot W \cdot 10^{-B/20} \cdot \tau_m}{\tau_r} \quad (57)$$

où:

B : profondeur de la signature

W : largeur de la signature

C : constante

τ_r : temps de propagation de référence pour la signature

τ_m : temps de propagation moyen.

Il convient de tenir compte de l'apparition relative des conditions de phase minimale et de phase non minimale en calculant les probabilités d'interruption séparément lorsque les signatures pour la phase minimale et la phase non minimale sont différentes.

Exemple de calcul:

Lieu: Pékin, Chine

Latitude: 39° 55' N

Longitude: 116° 25' E

Fréquence: $f = 2$ GHz

Longueur du trajet: $d = 80$ km

Hauteur de l'antenne d'émission: $h_t = 100$ m

Hauteur de l'antenne de réception: $h_r = 55$ m

Étape 1: Calculer le temps de propagation moyen à partir de la formule:

$$\tau_m = 0,7 \left(\frac{d}{50} \right)^{1,3} = 1,29 \text{ ns} \quad (58)$$

Étape 2: Il est nécessaire de calculer la probabilité d'existence d'évanouissements par trajets multiples η (voir § 7.2.2). La valeur de η est fonction de p_w , soit dans le cas présent: $\eta = 0,267$.

Étape 3: Considérons une modulation de forme MDP-8. Conformément à la Recommandation UIT-R F.1093, le paramètre de système normalisé pour cette modulation est $K_n = 7$. À noter que K_n dépend de la largeur et de la profondeur de la signature, mais aussi du temps de propagation de référence.

Étape 4: En prenant pour hypothèse des paramètres de système normalisé identiques pour les évanouissements avec phase minimale et les évanouissements avec phase non minimale, à savoir $K_{n,M} = K_{n,NM} = 7$, et une période (baud) de $T = 105$ ns (ce qui correspond à un débit binaire type), la probabilité d'interruption sélective se calcule ainsi:

$$P_s = 2,15 \eta \left(K_{n,M} + K_{n,NM} \right) \frac{\tau_m^2}{T^2} = 0,0012 \quad (59)$$

6.2.2 Méthodes de la marge de protection contre les évanouissements

L'utilisation des marges de protection contre les évanouissements en tant que caractéristique du système découle de la loi d'évanouissement pour les évanouissements par trajets multiples à une seule fréquence. En remplaçant la marge brute de protection contre les évanouissements par la marge nette (ou équivalente), on peut calculer le temps d'interruption sur le bond à partir des équations (15) ou (28) de la Recommandation UIT-R P.530. La marge nette de protection contre les évanouissements désigne la profondeur des évanouissements à une seule fréquence dépassée pendant le même nombre de secondes qu'un certain seuil du taux d'erreur (par exemple, 10^{-3}).

Autre approche adoptée pour la méthode de la marge: l'utilisation de taux de dispersion afin de prendre en compte la dispersion des évanouissements. Dans cette méthode, la marge nette de protection contre les évanouissements est considérée comme l'association des effets du bruit thermique, des brouillages intersymboles dus à la dispersion par trajets multiples et des autres brouillages. On peut par exemple déterminer la marge de protection contre les évanouissements dispersifs d'un signal radioélectrique sur un trajet dont on connaît le taux de dispersion, DR_θ . La valeur obtenue est prise comme référence de la marge de protection contre les évanouissements dispersifs (DFMR). La marge de protection contre les évanouissements dispersifs qui serait mesurée ou prévue sur un trajet de taux de dispersion DR est alors donnée par la formule:

$$DFM = DFMR - 10 \log (DR/DR_\theta) \quad (60)$$

DR est donné par l'équation:

$$DR = \frac{T_{IBPD}}{T_{SFF} \cdot (BF)^2} \quad (61)$$

où:

- T_{IBPD} : durée pendant laquelle une valeur choisie de la différence de puissance dans la bande (IBPD) est dépassée
- T_{SFF} : durée pendant laquelle une valeur choisie de l'évanouissement sur une seule fréquence (SFF) est dépassée
- BF : facteur de correction de largeur de bande, égal au rapport de 22 MHz à la largeur de bande des mesures.

6.2.3 Méthodes utilisant des statistiques de dispersion d'amplitude linéaire (LAD)

La distorsion de propagation est la combinaison de deux phénomènes, à savoir la distorsion d'amplitude et la distorsion du temps de propagation. La distorsion provoquée par un évanouissement dû à deux trajets revêt une forme complexe qui ne peut être composée seulement d'une dispersion linéaire d'amplitude (LAD). C'est toutefois la dispersion linéaire d'amplitude qui prédomine. La notion de seuil de LAD rend bien compte, avec précision, des effets que d'autres distorsions, telles que la distorsion du temps de propagation ou des distorsions d'amplitude d'un ordre supérieur, ont sur les interruptions. Il s'ensuit qu'on peut estimer la probabilité d'interruptions provoquées par des évanouissements sélectifs en fréquence si l'on connaît la LAD équivalente et la récurrence de la LAD.

Pour chaque trajet hertzien, la distribution cumulative de la dispersion d'amplitude dans la bande (IBAD) peut être déterminée pour la bande du canal à l'aide de résultats expérimentaux ou par le calcul, en utilisant la méthode décrite ci-dessous [Martin *et al.*, 1993].

Sachant que la fonction d'autocorrélation ρ de la profondeur des évanouissements à deux fréquences fixes dépend principalement des réflexions par le sol, il est possible de calculer la distribution cumulative de l'IBAD pour la largeur de bande du canal sur un trajet hertzien donné. Le temps d'interruption pendant un laps de temps donné dépendra de D_c (dépassement du ratio porteuse sur bruit C/N par rapport à la marge brute de protection contre les évanouissements MB) et de S (valeur de l'IBAD statistiquement associée à D_c).

Sans égalisation numérique, l'équation permettant de calculer la valeur S de l'IBAD donnant un TEB de 10^{-3} , pour différentes valeurs de D_c et différents types de modulation, se présente comme suit:

$$S = C_0^2 \left[1 - \frac{1}{(1 + D_C^{1/15})^n} \right] \cdot F^{0,2} \quad (62)$$

où:

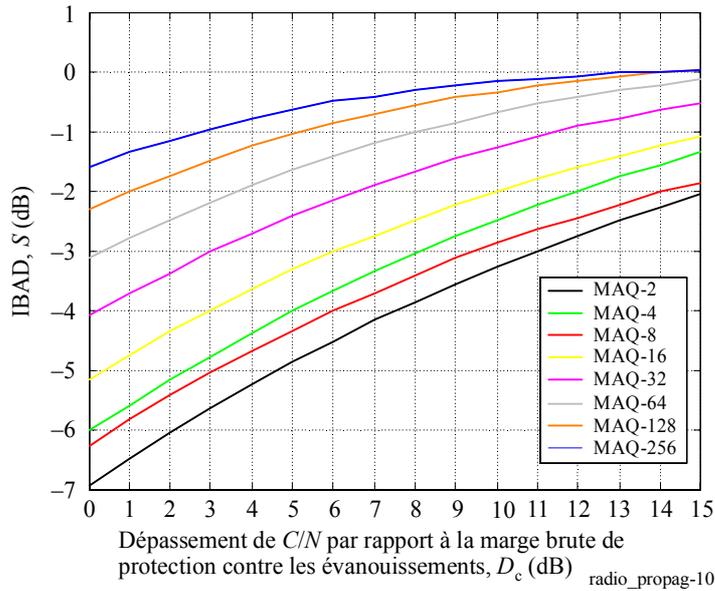
$$n = \frac{\sqrt{N}}{10} \quad (63)$$

$$\log C_0^2 = -0,74 \log (N) + 1,91 \quad (64)$$

$F = 9 - N$ avec $F = 1$ si $F < 1$. N est le nombre de niveaux de modulation.

À titre d'exemple, la Fig. 10 illustre les courbes de valeur de l'IBAD, S , obtenues en appliquant la procédure ci-dessus, en fonction du dépassement de C/N par rapport à MB, pour différents niveaux de modulation N .

FIGURE 10
Valeur de l'IBAD, S , en fonction du dépassement de C/N par rapport à MB



La valeur S_E de l'IBAD donnant un TEB de 10^{-3} avec égalisation linéaire dans le domaine temporel est tirée de la valeur S sans égalisation en appliquant l'équation suivante:

$$S_E = S * k_E \quad (65)$$

où:

$$k_E = k + 2,46/N \quad (66)$$

et

$$\log k = 0,6636 \log N - 0,577 \quad (67)$$

Cette équation est valable jusqu'à MAQ-256.

La valeur correcte du temps d'interruption peut être obtenue par un calcul itératif pour ajuster la valeur S tirée de l'équation ci-dessus à la valeur S tirée de la courbe d'équiprobabilité de S et des profondeurs d'évanouissement F données par la fonction d'autocorrélation ρ qui caractérise le trajet hertzien.

7 Dégradation de la discrimination de polarisation croisée

Pour accroître la capacité des canaux sans augmenter la largeur de bande, on peut recourir indépendamment à la polarisation orthogonale (linéaire ou circulaire) pour l'émission sur le même canal de fréquence et le même trajet. Cette technique présente cependant un risque: lors de la propagation dans l'atmosphère, une partie de l'énergie émise selon une polarisation peut se transférer à la polarisation qui lui est orthogonale, ce qui entraîne des brouillages dans le même canal dans le cas des systèmes avec réutilisation des fréquences. Dans une moindre mesure, cet effet peut aussi causer des brouillages dans la voie adjacente, dans le cas des systèmes entrelacés dans le domaine fréquentiel. Lorsque deux signaux polarisés orthogonalement, a et b , sont émis avec le même niveau, le rapport entre le signal reçu copolaire (ac ou bc) et le signal reçu contrapolaire (bx ou ax) dans le canal est appelé isolement de polarisation (XPI). Ce paramètre est souvent utilisé lors de la conception des faisceaux hertziens. Ces ratios ac/bx et bc/ax ne sont pas nécessairement identiques. En outre, les expériences de propagation fournissent souvent des mesures de la discrimination de polarisation croisée (XPD), qui correspond au rapport ac/ax lorsque seule la polarisation a est émise. Autrement dit, le signal copolaire ac et le signal contrapolaire ax sont mesurés indépendamment et en

l'absence de tout signal de polarisation orthogonale b . Du fait des caractéristiques du diagramme de rayonnement des antennes aux deux extrémités, le signal reçu présente une composante contrapolaire même dans des conditions normales de propagation dans une atmosphère de référence. La XPD associée peut subir des dégradations importantes du fait de la pluie ou d'autres hydrométéores, mais aussi pendant des périodes de propagation par trajets multiples. Le présent chapitre expose le principe utilisé dans les méthodes de prévision figurant dans la Recommandation UIT-R P.530 en vue de l'estimation de la diminution de la XPD par temps clair ou par temps pluvieux. Bien que différents d'un point de vue théorique (comme on vient de le voir), le XPI et la XPD peuvent être considérés comme étant identiques pour des applications pratiques [Oguchi, 1973].

7.1 Modèle de canal

L'étude présentée dans les sections ci-dessous suit l'approche figurant dans le rapport final COST 235 [COST, 1996].

Le développement des faisceaux hertziens avec réutilisation des fréquences par polarisations orthogonales a nécessité d'étendre le modèle de canal de propagation afin de tenir compte des caractéristiques de transmission de l'atmosphère dans les deux plans de polarisation. Nous adoptons, dans un premier temps, une approche générale qui consiste à examiner tous les effets possibles (dus à la propagation et aux antennes). Dans un second temps, seules les composantes significatives sont conservées. Le phénomène de dépolarisation est donc décrit en fonction du facteur XPD.

La matrice de transmission M peut être définie en considérant les antennes et l'atmosphère (entre les deux antennes) séparément. Avant de calculer la matrice, quelques remarques préalables s'imposent.

Soit E_0 l'intensité du champ au niveau du récepteur et E_i l'intensité du champ au niveau de l'émetteur. Ces deux valeurs peuvent s'exprimer sous forme de vecteur colonne, dont les éléments sont les composantes verticale (V) et horizontale (H) des champs:

$$E_0 = \begin{bmatrix} E_{H_0} \\ E_{V_0} \end{bmatrix} \quad (68)$$

$$E_i = \begin{bmatrix} E_{H_i} \\ E_{V_i} \end{bmatrix}$$

Les effets des antennes d'émission et de réception sont représentés par les diagrammes de rayonnement copolaire et contrapolaire des antennes dans les plans V et H, dénommés respectivement $g_{V,H}$ et $x_{V,H}$:

$$T = \begin{bmatrix} g_{TV} & x_{TV} \\ x_{TH} & g_{TH} \end{bmatrix} \quad (69)$$

$$R = \begin{bmatrix} g_{RV} & x_{RV} \\ x_{RH} & g_{RH} \end{bmatrix}$$

La matrice de transmission du médium de propagation s'écrit:

$$S = \begin{bmatrix} S_{VV} & S_{VH} \\ S_{HV} & S_{HH} \end{bmatrix} \quad (70)$$

La matrice de transmission M peut être obtenue à partir de l'équation matricielle suivante:

$$E_0 = R \cdot S \cdot T \cdot E_i = M \cdot E_i \quad (71)$$

La forme développée de la matrice de transmission donne:

$$M = \begin{bmatrix} M_{VV} & M_{VH} \\ M_{HV} & M_{HH} \end{bmatrix} \quad (72)$$

Les équations (74) permettent d'exprimer chacune des composantes:

$$\begin{aligned} M_{VV} &= g_{RV} \cdot S_{VV} \cdot g_{TV} \\ M_{VH} &= g_{RV} \cdot S_{VV} \cdot x_{TV} + g_{RV} \cdot S_{VH} \cdot g_{TH} + x_{RV} \cdot S_{HH} \cdot g_{TH} \\ M_{HV} &= x_{RH} \cdot S_{VV} \cdot g_{TV} + g_{RH} \cdot S_{HV} \cdot g_{TV} + g_{RH} \cdot S_{HH} \cdot x_{TH} \\ M_{HH} &= g_{RH} \cdot S_{HH} \cdot g_{TH} \end{aligned} \quad (73)$$

Les termes dans lesquels au moins deux des trois éléments sont diagonaux ont été omis, car les termes de transmission croisée sont en général beaucoup plus petits que les termes de transmission directe.

Le champ reçu selon chaque polarisation peut être déduit des équations suivantes:

$$\begin{aligned} E_{V0} &= M_{VV} \cdot E_{Vi} + M_{VH} \cdot E_{Hi} \\ E_{H0} &= M_{HV} \cdot E_{Vi} + M_{HH} \cdot E_{Hi} \end{aligned} \quad (74)$$

La discrimination de polarisation croisée s'obtient conformément à la définition usuelle:

$$\begin{aligned} XPD_V &= -20 \log \left[\frac{E_{H0}}{E_{V0}} \right]_{E_{Hi}=0} = -20 \log \left(\frac{M_{HV}}{M_{VV}} \right) \\ XPD_H &= -20 \log \left[\frac{E_{V0}}{E_{H0}} \right]_{E_{Vi}=0} = -20 \log \left(\frac{M_{VH}}{M_{HH}} \right) \end{aligned} \quad (75)$$

L'isolement du canal contrapolaire est donné par:

$$\begin{aligned} XPI_V &= -20 \log \left(\frac{M_{VH}}{M_{VV}} \right)_{E_{Hi}=E_{Vi}} \\ XPI_H &= -20 \log \left(\frac{M_{HV}}{M_{HH}} \right)_{E_{Hi}=E_{Vi}} \end{aligned} \quad (76)$$

En règle générale, l'hypothèse suivante est satisfaite [Olsen, 1981]:

$$\begin{aligned} XPD_V &\cong XPI_V \\ XPD_H &\cong XPI_H \end{aligned} \quad (77)$$

7.1.1 Champ reçu nominal

Dans le cas d'un champ reçu normal, la contribution due à la propagation s'exprime comme suit:

$$\begin{aligned} S_{VV} &= S_{HH} = 1 \\ S_{VH} &= S_{HV} = 0 \end{aligned} \quad (78)$$

Par souci de simplicité, on suppose que les antennes possèdent des diagrammes de rayonnement identiques dans les plans H et V . Par conséquent, les diagrammes de rayonnement copolaire et contrapolaire dans les plans V et H sont identiques et notés g_{TR} et x_{TR} .

L'isolement est donc donné par:

$$XPI = -20 \log \left(\frac{x_R}{g_R} + \frac{x_T}{g_T} \right) \quad (79)$$

Les propriétés de discrimination des antennes correspondent aux effets combinés des diagrammes de rayonnement copolaire et contrapolaire:

$$\begin{aligned} X_{RN} &= -20 \log \left(\frac{x_R}{g_R} \right) \\ X_{TN} &= -20 \log \left(\frac{x_T}{g_T} \right) \end{aligned} \quad (80)$$

Dans les applications types, les antennes sont en général orientées selon l'axe de visée, ce qui signifie que $g_T = g_R = 1$. L'équation (80) devient donc:

$$\begin{aligned} X_{RN} &= -20 \log (x_R) \\ X_{TN} &= -20 \log (x_T) \end{aligned} \quad (81)$$

On déduit de ces deux équations x_R et x_T , qui sont ensuite remplacés dans l'équation (79), ce qui donne:

$$XPI = -20 \log \left(10^{-\frac{X_{RN}}{20}} + 10^{-\frac{X_{TN}}{20}} \right) \quad (82)$$

Cette expression n'intégrant aucun effet de propagation additionnel, elle ne doit être utilisée qu'en tant qu'expression nominale dans l'installation des équipements.

7.1.2 XPI dû à la propagation (raisonnement à un rayon)

Dans ce cas, les éléments de la matrice de transmission de propagation (évanouissements non sélectifs en fréquence) sont:

$$\begin{aligned} S_{VV} &= l_V \exp(-j \phi_V) \\ S_{HH} &= l_H \exp(-j \phi_H) \\ S_{VH} &= d_V \exp(-j \gamma_V) \\ S_{HV} &= d_H \exp(-j \gamma_H) \end{aligned} \quad (83)$$

où:

l et ϕ : affaiblissement additionnel et déplacement de phase sur le canal copolaire

d et γ : affaiblissement et déplacement de phase sur le canal contrapolaire.

En utilisant l'équation (76) et l'hypothèse susmentionnée selon laquelle les antennes ont les mêmes diagrammes de rayonnement dans les plans H et V, l'isolement s'exprime comme suit:

$$XPI = -20 \log \left[\frac{g_T x_R + x_T g_R (l_H / l_V) \exp [-j(\varphi_H - \varphi_V)]}{g_T g_R} + \frac{d_H}{l_V} \exp [-j(\gamma_H - \varphi_V)] \right] \quad (84)$$

Cette équation peut être utilisée pour modéliser les conditions par temps clair et par temps pluvieux.

7.1.2.1 Par temps clair

Dans l'hypothèse où la différence d'affaiblissement entre les composantes H et V est négligeable, $(l_H / l_V) \exp [-j(\varphi_H - \varphi_V)]$ vaut approximativement 1 et l'équation (84) devient:

$$XPI = -20 \log \left[\frac{x_R}{g_R} + \frac{x_T}{g_T} + \frac{d_H}{l_V} \exp [-j(\gamma_H - \varphi_V)] \right] \quad (85)$$

Du fait des variations de l'indice de réfraction de l'atmosphère, les rayons électromagnétiques arrivent en général avec un angle δ différent de l'angle nominal. Par conséquent:

$$-20 \log \left[\frac{x_R(\delta)}{g_R(\delta)} \right] = X_R(\delta) - G_R(\delta) \quad (86)$$

L'équation suivante donne une valeur approchée du diagramme de rayonnement dans le plan contrapolaire:

$$X_R(\delta) = X_{RN} - Q(\delta) \quad (87)$$

où $Q(\delta)$ correspond à la dégradation de la discrimination de polarisation croisée du fait du mauvais alignement dû aux effets de la propagation.

La contribution contrapolaire due aux effets de la propagation est donnée par:

$$XPI_P = -20 \log \left[\frac{d_H}{l_V} \exp [-j(\gamma_H - \varphi_V)] \right] \quad (88)$$

Moyennant les substitutions appropriées et en tenant compte des éléments figurant dans la littérature scientifique [Olsen, 1981], selon lesquels la contribution contrapolaire due aux effets de la propagation est inférieure d'environ 200 dB au niveau copolaire nominal, l'équation (84) fournit l'expression de l'isolement suivante:

$$XPI = -20 \log \left[10^{-\frac{x_{RN} - Q(\delta) - G(\delta)}{20}} + 10^{-\frac{x_{TN}}{20}} \right] \quad (89)$$

7.1.2.2 Par temps pluvieux

Par temps pluvieux, l'équation (84) ne peut en général pas être simplifiée même si, pour des fréquences inférieures à 15 GHz, l'approximation $(l_H / l_V) \exp [-j(\varphi_H - \varphi_V)] \cong 1$ est toujours valable.

L'isolement est donc donné par la formule:

$$XPI = -20 \log \left[10^{-\frac{x_{RN}}{20}} + 10^{-\frac{x_{TN}}{20}} + 10^{-\frac{XPD_P}{20}} \right] \quad (90)$$

La valeur médiane de la contribution due à la propagation, XPD_P , est donnée par l'équation d'équiprobabilité suivante:

$$XPD_P = U - V \log(CPA) \quad (91)$$

où:
$$CPA = -20 \log | l_V \exp(-j\varphi_V) | \quad (92)$$

désigne l'affaiblissement copolaire ($g_T = g_R = 1$), et les paramètres U et V peuvent être évalués à partir des résultats présentés dans [Olsen, 1981].

7.1.3 XPI dû à la propagation par trajets multiples (2 rayons)

Dans le cas d'interférences entre deux composantes de rayon ou plus, les effets sélectifs en fréquence deviennent importants. Dans le modèle à deux rayons (rayon 1 et rayon 2), le champ reçu résultant est en général tiré de l'équation (1) et s'exprime par:

$$\bar{E}_0 = \bar{E}_{01} + \bar{E}_{02} = (\bar{M}_1 + \bar{M}_2) \cdot \bar{E}_i = \bar{M} \cdot \bar{E}_i \quad (93)$$

En utilisant l'équation (93) et la définition (75), l'isolement devient:

$$XPI = -20 \log \left[\frac{\frac{x_{T1}}{g_{T1}} + \frac{x_{R1}}{g_{R1}} + b \left(\frac{x_{T2}}{g_{T2}} + \frac{x_{R2}}{g_{R2}} \right) \exp(-j\varphi) + \frac{d_{H1}}{l_{V1}} \exp(-j\varphi_1) + \frac{d_{H2}}{l_{V2}} b \exp(-j\varphi_2)}{1 + b \exp(-j\varphi)} \right] \quad (94)$$

où:

$$b = \frac{g_{T2} l_{V2} g_{R2}}{g_{T1} l_{V1} g_{R1}} \quad (95)$$

est l'amplitude relative, et:

$$\begin{aligned} \varphi &= \varphi_{V2} - \varphi_{V1} \\ \varphi_1 &= \varphi_{H1} - \varphi_{V1} \\ \varphi_2 &= \varphi_{H2} - \varphi_{V1} \end{aligned} \quad (96)$$

où l'approximation $(l_H / l_V) \exp[-j(\varphi_H - \varphi_V)] \cong 1$, $(l_H / l_V) \exp[-j(\varphi_H - \varphi_V)] \cong 1$ est utilisée pour les deux rayons. On notera que le numérateur et le dénominateur dans l'équation (94) représentent les éléments de la matrice de transmission M sans la valeur constante:

$$a_1 = g_{T1} l_{V1} g_{R1} \exp(-j\varphi_{V1}) \quad (97)$$

égale à l'affaiblissement non sélectif sur le canal copolaire.

En prenant pour le rayon de référence (rayon 1) les mêmes hypothèses et relations que celles de la section précédente pour un rayon unique, et dans l'hypothèse où les deux antennes (Tx et Rx) sont identiques, l'équation (94) devient:

$$XPI = -20 \log \left[\frac{10^{-\frac{XPI_1}{20}} + b \left(2 \times 10^{-\frac{X_{RN} - Q(\delta_2) - G(\delta_2)}{20}} + d_{H2} \right) \exp(-j\varphi)}{1 + b \exp(-j\varphi)} \right] \quad (98)$$

où XPI_1 est donné par l'équation (84), et δ_1 et δ_2 sont les angles d'arrivée du rayon de référence et du rayon secondaire par rapport à la direction de pointage nominale.

7.1.4 Dépendance par rapport à l'affaiblissement copolaire

La dépendance de XPI par rapport à l'affaiblissement du signal copolaire peut s'exprimer en moyenne par une relation analogue à celle présentée dans la Recommandation UIT-R P.530:

$$XPI = C - CPA \quad (99)$$

où:

$$CPA = -20 \log [a_1 (1 + b \exp(-j\varphi))] \quad (100)$$

La constante C peut être obtenue à partir de l'équation (98):

$$C = A_i - 20 \log \left[10^{-\frac{XPI_1}{20}} + b \left(2 \times 10^{-\frac{X_{RN} - Q(\delta_2) - G(\delta_2)}{20}} + d_{H2} \right) \exp(-j\varphi) \right] \quad (101)$$

Les évanouissements profonds étant en général majoritairement sélectifs en fréquence, la contribution des évanouissements uniformes a_1 dans l'équation (100) peut être négligée. De plus, étant donné les limites $b \rightarrow 1$ et $\exp(-j\varphi) \rightarrow 1$, l'équation suivante permet d'obtenir une valeur approchée de C :

$$C = -20 \log \left[10^{-\frac{X_{TN}}{20}} + 10^{-\frac{X_{RN} - Q(\delta_1) - G(\delta_1)}{20}} - 2 \times 10^{-\frac{X_{RN} - Q(\delta_2) - G(\delta_2)}{20}} - d_{H2} \right] \quad (102)$$

Il importe de noter que C est quasiment indépendante des évanouissements du canal copolaire (paramètres a_1 et b) et que l'équation (101) devient vraiment conforme à la séparation des variables. L'équation (102) montre une dépendance supplémentaire par rapport à des variables aléatoires, telles que les angles d'arrivée des rayons et la dépolarisation du sol (le cas échéant).

On notera également que, dans l'équation (99), en particulier dans le cas d'antennes d'émission et de réception identiques, le paramètre C est quasiment égal à d_{H2} (dB). Autrement dit, ce sont les propriétés de discrimination du médium de propagation, et non les antennes, qui dictent le comportement des canaux à double polarisation en cas de propagation avec évanouissements profonds.

Une valeur approchée de C peut être obtenue par simulation des processus aléatoires inclus dans l'équation (102) ou à partir de résultats expérimentaux.

7.2 Prévision des statistiques de la XPD par temps clair

Toujours en se fondant sur les résultats du rapport final COST 235, il est nécessaire, pour évaluer les chances d'obtenir une qualité de transmission acceptable en double polarisation, de déterminer deux éléments: d'une part (objectif n° 1), une méthode de prévision satisfaisante de la dégradation de XPI (ou XPD), qui soit applicable à toute liaison hertzienne; d'autre part (objectif N° 2), une méthode de prévision de la qualité de fonctionnement, capable de donner la qualité de transmission que l'on peut obtenir avec ou sans annuleurs de brouillage de transpolarisation (XPIC).

S'agissant de la première méthode à déterminer (objectif N° 1), des résultats expérimentaux ont montré que les distributions de XPI et XPD sont statistiquement équivalentes. On peut donc évaluer les distributions de XPI à partir de mesures de distributions de XPD, telles celles tirées généralement des niveaux de réception des signaux copolaire et contrapolaire lors d'une émission selon une polarisation unique (comme défini dans l'équation (72)). Le point de départ est l'équation (95), qui nécessite une évaluation du paramètre C . Dans l'hypothèse où la distribution cumulative du signal copolaire présente une pente de 10 dB/décade (distribution de Rayleigh pour les évanouissements profonds), la distribution cumulative de XPD s'exprime ainsi:

$$P_r(XPD < x) = P_0 \times 10^{-\frac{C-x}{10}} \quad \text{pour } x < C - 15 \text{ dB} \quad (103)$$

où P_0 est le facteur d'occurrence des évanouissements par trajets multiples. La démarche la plus simple est de considérer le paramètre C comme une valeur constante tirée de données expérimentales. La Recommandation UIT-R P.530 propose l'équation suivante:

$$C = XPD_0 + Q \quad (104)$$

où XPD_0 correspond à la XPD statique lorsqu'il n'y a pas d'évanouissement et où Q est un facteur d'amélioration fortement dépendant de la pente des diagrammes de rayonnement contrapolaire des antennes (x_T et x_R).

Dans le rapport final COST 235, deux méthodes distinctes de prévision sont envisagées: la méthode P et la méthode Q . La méthode Q ayant été choisie comme principe de base de la procédure de prévision dans la Recommandation UIT-R P.530, elle est examinée ici en détail. On trouvera de plus amples informations sur la méthode P dans le rapport final COST 235 [COST, 1996]. La méthode Q permet de déterminer le paramètre C à partir de la formule générale figurant à l'équation (101) en effectuant une simulation Monte Carlo des processus aléatoires en jeu. S'agissant de l'objectif N° 2, les deux méthodes considèrent que le signal brouilleur contrapolaire est une source de bruit à ajouter au bruit thermique. La méthode Q repose sur l'hypothèse (fondée sur des données expérimentales) selon laquelle le signal copolaire et le signal brouilleur contrapolaire sont fortement décorrélés, ce qui signifie que le XPI se dégrade lorsque le signal copolaire subit de forts évanouissements sélectifs et que, en général, le signal contrapolaire n'en subit pas. Dans ce cas, les distributions de XPI peuvent être utilisées pour évaluer la contribution de la dégradation du XPI aux interruptions, quantité qui, associée aux interruptions par évanouissements uniformes, donne le total des interruptions non sélectives. En utilisant un facteur d'amélioration de la polarisation croisée (XPIF) adapté et dépendant du matériel, il est possible d'évaluer la contribution de la dégradation du XPI aux interruptions en présence d'un dispositif XPIC.

7.2.1 Description de la méthode Q

La méthode Q a été développée dans le cadre du projet COST 235.

Le modèle est présenté ci-dessous sous la forme d'une procédure pas à pas.

La première partie de cette procédure consiste à évaluer les paramètres XPD_0 et Q de l'équation (104).

XPD_0 est calculé à partir des équations suivantes:

$$XPD_0 = XPD_g + 5 \quad XPD_g < 35 \quad (105)$$

$$XPD_0 = 40 \quad XPD_g > 35 \quad (106)$$

On calcule ensuite le facteur d'occurrence des évanouissements, p_0 , défini comme le pourcentage de temps où $A = 0$ dB est dépassé pendant le mois le plus défavorable moyen. À partir de cette valeur, la fraction des évanouissements correspondant aux trajets multiples est isolée à l'aide du facteur d'occurrence de trajets multiples, η , défini comme la probabilité d'occurrence d'un évanouissement relativement profond à une fréquence donnée.

Pour le calcul du facteur d'occurrence des évanouissements par trajets multiples, la Recommandation UIT-R P.530 utilise l'expression suivante:

$$\eta = 1 - e^{-0,2(P_0)^{0,75}} \quad (107)$$

Selon la méthode Q , le facteur Q est ensuite évalué en adoptant l'approche paramétrique suivante:

$$Q = -10 \log \left(\frac{K \cdot \eta}{P_0} \right) \quad (108)$$

La Recommandation UIT-R P.530 définit le facteur K de l'équation (108), k_{XP} , et propose de déterminer sa valeur pour une ou deux antennes d'émission à l'aide de l'équation suivante:

$$k_{XP} = \begin{cases} 0,7 & \text{une antenne d'émission} \\ 1 - 0,3 \exp \left[-4 \times 10^{-6} \left(\frac{s_t}{\lambda} \right)^2 \right] & \text{deux antennes d'émission} \end{cases} \quad (109)$$

où s_t désigne l'espacement des antennes et λ la longueur d'onde de la porteuse dans des unités compatibles.

Pour terminer, le paramètre C est calculé à partir de l'équation (101).

La probabilité d'interruption P_{XP} due à la polarisation croisée par temps clair est calculée au moyen de la formule:

$$P_{XP} = P_0 \times 10^{-\frac{M_{XPD}}{10}} \quad (110)$$

où M_{XPD} , marge de XPD équivalente pour un TEB de référence exprimée en dB, est donnée par:

$$M_{XPD} = \begin{cases} C - \frac{C_0}{I} & \text{sans XPIC} \\ C - \frac{C_0}{I} + XPIF & \text{avec XPIC} \end{cases} \quad (111)$$

Ici, C_0/I est le rapport porteuse/brouillage pour un TEB de référence; il peut être évalué à partir de simulations ou de mesures.

XPIF est un facteur d'amélioration de la polarisation croisée mesuré en laboratoire, qui correspond à la différence de XPI pour un rapport porteuse/bruit suffisamment élevé (en général 35 dB) et pour un TEB donné, pour des systèmes avec et sans dispositif XPIC. Une valeur type de XPIF est 20 dB environ.

Dans l'hypothèse où les évanouissements profonds sur le signal copolaire suivent une distribution de Rayleigh, la contribution de la dégradation de XPD aux interruptions du faisceau est donnée par:

$$P_{XP} = P_0 \times 10^{-\frac{M_{XPD}}{10}} \quad (112)$$

7.2.2 Exemples d'application

Lieu: Houston, Texas, États-Unis

Latitude: 29° 46' N

Longitude: 264° 78' E

Fréquence: $f = 8$ GHz

Longueur du trajet: $d = 45$ km

Hauteur de l'antenne d'émission: $h_t = 500$ m

Hauteur de l'antenne de réception: $h_r = 610$ m

Étape 1: Pour $XPD_g = 42$ dB, à savoir la XPD minimale garantie par le constructeur pour les antennes d'émission/réception, $XPD_0 = 40$ dB.

Étape 2: La probabilité d'existence d'évanouissements par trajets multiples est ensuite obtenue à l'aide de la formule:

$$\eta = 1 - e^{-0,2P_0^{0,75}} = 0,026 \quad (113)$$

où $P_0 = p_w/100 = 0,0659$ désigne le facteur d'occurrence de trajets multiples (pourcentage de temps où $A = 0$ dB est dépassé).

Étape 3: Déterminer $Q = -10 \log \left(\frac{k_{XP} \eta}{P_0} \right) = 5,622$

où:

$$k_{XP} = 1 - 0,3 \exp \left[-4 \times 10^{-6} \left(\frac{s_t}{\lambda} \right)^2 \right] = 0,7033 \quad (114)$$

en considérant que les deux signaux polarisés orthogonalement sont émis par des antennes différentes, dont l'espacement vertical est de $s_t = 2$ m.

Étape 4: La marge de XPD équivalente pour un TEB de référence (dans l'hypothèse où un annuleur de brouillage de transpolarisation de caractéristique $XPIF = 20$ dB est utilisé) est donnée par la formule:

$$M_{XPD} = C - C_0 / I + XPIF = 33,62 \quad \text{dB} \quad (115)$$

où $C = XPD_0 + Q = 45,622$ dB et où $C_0/I = 32$ dB désigne le rapport porteuse/brouillage pour un TEB de référence.

Étape 5: Enfin, la probabilité d'interruption due à la polarisation croisée par temps clair est donnée par la formule:

$$P_{XP} = P_0 \times 10^{-\frac{M_{XPD}}{10}} = 2,8 \times 10^{-5} \quad (116)$$

7.3 Prévion des statistiques de XPD dans des conditions de précipitations

Selon les données expérimentales dont on dispose, les gouttes de pluie, initialement de forme sphérique, prennent, à mesure que leur taille augmente, la forme d'ellipsoïdes de plus en plus aplatis. Les très grosses gouttes développent dans leur partie plate une dépression concave [Pruppacher et Beard, 1970 et Pruppacher et Pitter, 1971]. En outre, les gouttes de pluie peuvent également être inclinées par rapport à l'horizontale [Saunders, 1971]. Ces deux phénomènes, qui sont la cause de la polarisation croisée par temps de pluie, sont examinés en détail dans le Manuel *Radiométéorologie*. La plupart des méthodes utilisées aujourd'hui pour prévoir les statistiques de XPD dans des conditions de précipitations sont semi-empiriques [Olsen, 1981]. Elles reposent sur des modèles théoriques généraux selon lesquels la pluie est constituée de gouttes inclinées aléatoirement [Olsen, 1981] et dont les paramètres sont choisis pour assurer une adéquation approximative avec les données expérimentales. On prend souvent pour hypothèse un modèle à deux paramètres reposant sur une distribution gaussienne des angles d'inclinaison des gouttes de pluie [Kobayashi, 1977 et Nowland *et al.*, 1977].

7.3.1 Principe des méthodes de prévion de la XPD dans des conditions de précipitations

Dans la majorité des applications pratiques, la relation entre la discrimination de polarisation croisée (XPD) et l'affaiblissement copolaire sur le trajet (CPA) est de la plus haute importance pour effectuer des prévisions à partir des statistiques d'affaiblissement.

La pluie intense détermine les réductions de la XPD observées aux faibles pourcentages de temps. S'agissant des trajets pour lesquels on ne dispose pas d'autres prévisions ou mesures détaillées, on peut obtenir une

estimation approximative de la distribution inconditionnelle de la XPD à partir d'une distribution cumulative de l'affaiblissement copolaire dû à la pluie (CPA), à l'aide de la relation d'équiprobabilité:

$$XPD = U - V(f) \log CPA \quad \text{dB} \quad (117)$$

Les coefficients U et $V(f)$ dépendent, en général, de plusieurs variables et paramètres empiriques, en particulier de la fréquence f . Pour les trajets à visibilité directe avec de petits angles d'élévation et une polarisation horizontale ou verticale, ces coefficients peuvent être exprimés de façon approchée par les formules:

$$U = U_0 + 30 \log f \quad (118)$$

$$\begin{aligned} V(f) &= 12,8 f^{0,19} && \text{pour } 8 \leq f \leq 20 \text{ GHz} \\ V(f) &= 22,6 && \text{pour } 20 < f \leq 35 \text{ GHz} \end{aligned} \quad (119)$$

Une valeur moyenne de U_0 d'environ 15 dB, avec une limite inférieure de 9 dB pour toutes les mesures, a été obtenue pour des affaiblissements supérieurs à 15 dB.

La variabilité des valeurs de U et $V(f)$ est telle que la différence entre les valeurs de CPA pour les polarisations verticale et horizontale n'est pas significative pour l'évaluation de la XPD. Il est conseillé à l'utilisateur d'employer, dans la formule (117), la valeur de CPA correspondant à une polarisation circulaire.

Les statistiques de la XPD à long terme obtenues à une fréquence peuvent être transposées à une autre fréquence à l'aide de l'équation semi-empirique suivante:

$$XPD_2 = XPD_1 - 20 \log(f_2 / f_1) \quad \text{pour } 4 \leq f_1, f_2 \leq 30 \text{ GHz} \quad (120)$$

où XPD_1 et XPD_2 correspondent aux valeurs de la XPD qui ne sont pas dépassées pendant le même pourcentage de temps respectivement aux fréquences f_1 et f_2 .

La relation entre XPD et CPA est influencée par de nombreux facteurs, y compris la XPD résiduelle de l'antenne, dont on n'aura éventuellement pas tenu compte. La formule ci-dessus est moins précise pour de grands écarts de fréquences. À noter cependant que sa précision est maximale lorsque XPD_1 et XPD_2 correspondent aux mêmes polarisations (horizontale ou verticale).

7.3.2 Exemples d'application

Lieu: Paris, France

Latitude: 48° 52' N

Longitude: 02° 20' E

Fréquence: $f = 30$ GHz

Longueur du trajet: $d = 8$ km

Polarisation linéaire: $\tau = 90^\circ$

Étape 1: Pour les paramètres spécifiés, l'affaiblissement équivalent sur le trajet est déterminé par:

$$A_p = 10^{((U - C_0/I + XPIF)/V)} = 33 \quad \text{dB} \quad (121)$$

où $U = U_0 + 30 \log f = 15 + 30 \log 30 = 59,31$, le rapport porteuse/brouillage $C_0/I = 25$ dB et $V = 22,6$ pour cette gamme de fréquences. On n'utilise pas de dispositif XPIC.

Étape 2: Les paramètres suivants sont ensuite déterminés:

$$m = 23,26 \log [A_p / 0,12 A_{0,01} = 23,75] \quad (122)$$

$$n = (-12,7 + \sqrt{161,23 - 4m}) / 2 = -2,28 \quad (123)$$

Étape 3: Les interruptions de la XPD dues aux effets des précipitations sont données par:

$$P_{XPR} = 10^{n-2} = 5,25 \times 10^{-5} \quad (124)$$

7.4 Effets relatifs de la dégradation de la XPD par temps clair et par temps de pluie

Il n'y a pas de règle générale permettant de déterminer, en fonction des caractéristiques du trajet, lequel des deux effets (pluie ou trajets multiples) est prédominant. En appliquant les méthodes susmentionnées lors de la conception des faisceaux, l'utilisateur a donc tout intérêt à évaluer à la fois la diminution de la XPD due à la pluie et la diminution de la XPD due aux trajets multiples. Cela étant, on observe en général que, pour ce qui concerne les faisceaux à double polarisation horizontale et verticale, avec ou sans diversité, la dégradation est principalement due à la pluie sur les liaisons courtes et aux trajets multiples sur les liaisons longues. La plus petite longueur de trajet à partir de laquelle les effets par trajets multiples prédominent dépend de la fréquence, du climat, du dégagement du trajet, du fait que la liaison se situe au-dessus des terres ou au-dessus de l'eau et de l'emploi ou non de la diversité. Dans le cas des liaisons sans diversité, par exemple, des mesures effectuées dans la gamme de fréquences 10-12 GHz en Europe pour des longueurs de trajets inférieures à 20 km [Watson, 1976] montrent que la pluie a un effet plus important. Inversement, des mesures effectuées dans la gamme 6-13 GHz pour des longueurs de trajet supérieures à 50 km [Rooryck et Battesti, 1976] montrent que les effets dus aux trajets multiples prédominent. Ces mesures indiquent également que la dégradation de la XPD due à la pluie n'entraîne pas une augmentation significative du temps d'interruption, car elle tend à se produire au même moment que les grands affaiblissements.

7.5 Transpolarisation due aux tempêtes de sable et de poussière

À ce jour, aucune observation quantitative de transpolarisation pendant des tempêtes de poussière n'a été publiée dans la littérature scientifique en accès libre. Par conséquent, toutes les estimations de la transpolarisation sur une liaison à hyperfréquences pendant une tempête de sable ou de poussière reposent sur des considérations théoriques de taille, de forme, de concentration corpusculaire et de propriétés diélectriques des particules. Des études microscopiques [McEwan *et al.*, 1985 et Ghobrial et Sharief, 1987] ont clairement montré que les particules de sable et de poussière transportées par les tempêtes équatoriales ne sont pas de forme sphérique. Les calculs semblent en outre indiquer qu'en l'absence de turbulences et de cisaillement du vent, les forces hydrodynamiques ont tendance à orienter les particules en suspension selon leur grand axe dans le plan vertical [McEwan *et al.*, 1985]. En raison de cette anisotropie, on peut observer une dégradation importante de la XPD du fait du déphasage différentiel, même si l'affaiblissement n'est pas important. Ces observations s'appliquent parfois aux polarisations linéaires obliques [Bashir et McEwan, 1986]. Des études théoriques [Ghobrial et Sharief, 1987] semblent indiquer que, dans le cas de tempêtes de poussière sèche, la XPD en polarisation circulaire est liée à la visibilité par l'équation:

$$XPD = 91,6 - 20 \log (fd) + 21,4 \log V \quad (125)$$

où:

f : fréquence (GHz)

d : longueur du trajet (km)

V : visibilité (km).

Pour une poussière avec une teneur en humidité superficielle de 4%, la XPD est encore réduite de 1,7 dB environ.

8 Techniques d'atténuation des effets de la propagation par trajets multiples

Pour concevoir les liaisons de Terre à visibilité directe, il convient de prendre en compte les effets de l'évanouissement lent relativement non sélectif en fréquence (c'est-à-dire l'«évanouissement uniforme») ainsi que les effets de l'évanouissement sélectif en fréquence. On dispose, pour atténuer ces effets, d'un certain nombre de techniques, la plupart d'entre elles atténuant simultanément les deux types d'évanouissement. Ces mêmes techniques atténuent aussi fréquemment les diminutions de la discrimination de polarisation croisée.

On peut les regrouper en deux catégories: d'une part, les techniques nécessitant une forme de diversité en réception ou en émission, et d'autre part, les techniques qui ne reposent pas sur la diversité (celles qui relèvent purement du système, telles que l'égalisation adaptative, sont examinées dans le Manuel *Faisceaux hertziens numériques* de l'UIT-R).

Puisqu'il est souhaitable, pour des raisons économiques, d'éviter autant que possible de recourir à la diversité, on examine en premier lieu au § 8.1 les stratégies et techniques qui n'y font pas appel. Celles-ci conviennent également dans le cas des systèmes à diversité, et doivent être employées lorsque cela est possible, même si leur utilisation est peut-être moins nécessaire. Les techniques faisant appel à la diversité sont examinées au § 8.2, le § 8.2.1 traitant de la diversité d'espace, le § 8.2.2 de la diversité angulaire, le § 8.2.3 de la diversité de fréquence et le § 8.2.4 de la diversité de polarisation. Les techniques faisant appel à la diversité pour atténuer la diminution de la discrimination de polarisation croisée dans les systèmes à polarisation double et réutilisation des fréquences sont examinées séparément au § 8.3.

8.1 Stratégies et techniques ne faisant pas appel à la diversité

Les techniques d'atténuation des effets les plus importants liés aux évanouissements par trajets multiples ne qui ne font pas appel à la diversité répondent à une ou plusieurs des trois stratégies générales suivantes [Olsen, 1989]:

Stratégie A: Réduction de l'occurrence des «affaiblissements uniformes» importants dus aux mécanismes atmosphériques: ces mécanismes comprennent notamment l'étalement du faisceau (couramment appelé *defocusing* dans la littérature scientifique anglophone) et le découplage d'antenne (ces deux phénomènes se présentent souvent ensemble), ainsi que la propagation par trajets multiples dans l'atmosphère. Pour diminuer l'apparition de ces phénomènes, l'objectif est de réduire la probabilité que l'amplitude de l'onde atmosphérique (c'est-à-dire l'onde directe, sauf en présence de propagation par trajets multiples dans l'atmosphère) ne tombe à un niveau tel que les ondes réfléchies au sol ne la brouillent de façon destructive, entraînant ainsi de graves évanouissements par trajets multiples et d'importantes distorsions. Bien que la propagation atmosphérique par trajets multiples puisse être légèrement sélective en fréquence sur une bande, elle est généralement «uniforme» en ce qui concerne ses caractéristiques d'amplitude et de temps de propagation en comparaison de la propagation par trajets multiples de surface qui se produit lorsque l'onde atmosphérique rencontre de façon destructive une ou plusieurs ondes réfléchies au sol.

Stratégie B: Réduction de l'occurrence des réflexions de surface importantes: à l'instar de la première stratégie, l'objectif de cette stratégie est de réduire la probabilité d'interférences destructives entre l'onde atmosphérique et les ondes réfléchies par la surface, interférences qui entraînent de graves évanouissements par trajets multiples et d'importantes distorsions.

Stratégie C: Réduction du décalage temporel entre les réflexions de surface et l'onde atmosphérique: l'objectif de cette stratégie est de diminuer la gravité des distorsions d'amplitude et de temps de propagation qui apparaissent en cas d'interférences destructives entre l'onde atmosphérique et les ondes réfléchies de surface, interférences qu'on ne peut en général totalement éviter.

Les différentes techniques présentées dans la Recommandation UIT-R P.530 et détaillées ci-dessous répondent à une ou plusieurs de ces stratégies.

8.1.1 Augmentation de l'inclinaison du trajet

Cette technique, parfois appelée «technique de haut en bas» (*high-low*) [Vigants, 1975 et Fehlhäber, 1976], devrait être utilisée chaque fois que le terrain l'autorise. Elle permet de mettre en œuvre les stratégies A et B. D'une part, les effets de l'affaiblissement par étalement du faisceau et du découplage des antennes qui y est associé sont généralement limités lorsque l'on augmente l'angle de l'onde directe par rapport aux structures très réfractives à l'origine de ces effets, notamment les conduits. D'autre part, le niveau de l'onde ou des ondes à réflexion spéculaire et à réflexion par diffusion est en général limité étant donné que:

- une plus faible quantité d'énergie est émise de l'onde directe en direction de la surface;
- la combinaison des directivités des deux antennes dans le sens d'une réflexion est moindre;

– les angles rasants des ondes réfléchies sont généralement supérieurs.

Lorsque l'évanouissement de l'onde atmosphérique est dû à la propagation par trajets multiples dans l'atmosphère, les analyses de tracé de rayon fournissent également des résultats dans ce sens [Webster, 1983]: l'augmentation de l'inclinaison du trajet permet de réduire les effets sur le trajet.

Plusieurs équations de prévision figurant dans la Recommandation UIT-R P.530 montrent, de façon quantitative, que l'augmentation de l'inclinaison du trajet réduit les effets d'évanouissement par trajets multiples. Les équations (7) et (8) notamment font explicitement apparaître une diminution du pourcentage de temps pendant lequel une profondeur d'évanouissement donnée est dépassée. Cette relation est en fait la base du calcul du facteur d'occurrence de trajets multiples, qui régit la quantité d'évanouissement uniforme (voir équation (24)), la quantité d'évanouissement sélectif et la diminution de la XPD dans les systèmes à polarisation double et réutilisation des fréquences (voir équation (49)).

De toute évidence, ce sont les terrains accidentés ou montagneux qui tirent le mieux profit de cette technique. De plus, ce type de terrain présente en général l'avantage supplémentaire d'une moindre incidence des couches extrêmement réfractives, telles que les conduits, du fait de la rugosité et des altitudes concernées. Cette technique présente toutefois un inconvénient manifeste: les longueurs de trajet sont en général plus courtes. Il convient donc de trouver un compromis entre l'avantage économique que présentent de grandes longueurs de trajet et l'avantage technique (et éventuellement économique) d'une atténuation des effets les plus graves de la propagation par trajets multiples. Malheureusement, on ne dispose pas actuellement de règles claires permettant de déterminer ce compromis.

Si cette technique permet en général de diminuer la puissance des réflexions de surface, il arrive qu'on obtienne l'effet inverse. En toute logique, il conviendra ainsi d'éviter une configuration dans laquelle les principales réflexions de surface se produisent sur l'eau ou sur un terrain plat. En y prêtant suffisamment attention, on pourra choisir des configurations géométriques présentant le double avantage d'un trajet incliné et de réflexions de surface importantes du trajet bloquées par le terrain.

8.1.2 Réduction de l'incidence des réflexions de surface

La Recommandation UIT-R P.530 fournit plusieurs techniques visant à réduire l'incidence des réflexions de surface (stratégie B) dans le but de diminuer l'occurrence des évanouissements dus à la propagation par trajets multiples de surface. Le principe de ces techniques ainsi que quelques autres éléments pertinents sont présentés ci-dessous.

8.1.2.1 Effet d'écran du point de réflexion

Cette technique, utilisée depuis toujours dans la conception des faisceaux hertziens, consiste à profiter des collines, montagnes ou bâtiments présents le long du trajet pour protéger, par effet d'écran, les antennes des surfaces au sol présentant une réflexion spéculaire très importante (surfaces aquatiques, plaines, sommets de colline arrondis et déboisés, toits de bâtiment, etc.). Le tracé de rayon simulé sur ordinateur permet d'appliquer cette technique de façon efficace et de prendre en compte une large gamme de valeurs de facteur k équivalent. Lam et Webster [1985] fournissent un exemple de l'échec de cette technique du fait de la superréfraction de l'onde réfléchie par la surface sur la crête censée bloquer la réflexion, qui illustre bien l'importance de ces analyses de tracé de rayon.

8.1.2.2 Déplacement du point de réflexion vers une surface peu réfléchissante

Cette technique consiste à régler la hauteur de l'antenne à l'une des extrémités du trajet, ou aux deux extrémités, de façon à ce que les réflexions se produisent sur un terrain plus irrégulier ou sur une surface végétale. Il importe, dans toute la mesure possible, d'éviter les réflexions sur les surfaces aquatiques.

8.1.2.3 Choix optimal des hauteurs d'antenne

Cette technique, présentée sous la forme d'une procédure pas à pas dans la Recommandation UIT-R P.530, ne vise pas nécessairement à réduire le niveau des réflexions de surface, mais plutôt à assurer des interférences constructives entre l'onde directe et les principales ondes réfléchies de surface (en général une onde unique) de façon à éviter les effets préjudiciables des évanouissements par trajets multiples. Pour la gamme des valeurs de facteur k équivalent considérée, cette technique n'est envisageable que sur de courts

trajets, ou, dans une certaine mesure, des trajets plus longs à des fréquences inférieures. La procédure pas à pas présentée dans la Recommandation UIT-R P.530 est décrite de façon à permettre à l'utilisateur de déterminer à quel moment une certaine diversité est nécessaire.

Le principe de cette technique est présenté dans deux publications [Boithias, 1983 et Karl et Persson, 1998], qui ne diffèrent que par le type de solution adopté: la première utilise une solution complète, la seconde une solution sous forme de séries tronquées.

8.1.2.4 Choix de la polarisation verticale

On a intérêt à choisir une polarisation verticale plutôt qu'horizontale, en particulier pour les trajets au-dessus de l'eau à des fréquences inférieures à 2 GHz environ. La Recommandation UIT-R P.530 fournit des procédures pas à pas permettant de calculer le coefficient de réflexion équivalent de surface et de le mesurer.

La plupart des principes mathématiques sur lesquels reposent les techniques présentées dans la Recommandation UIT-R P.530 ont été décrits par [Boithias, 1983]. Seul élément additionnel, l'introduction d'un facteur d'irrégularité de la surface. L'approximation gaussienne initiale de ce facteur [Beckmann et Spizzichino, 1963] a été remplacée par une approximation gaussienne modifiée reposant sur des données expérimentales concernant la surface de la mer [Miller *et al.*, 1984]. L'hypothèse envisagée est que cette forme modifiée est également plus précise pour décrire le terrain [Olsen *et al.*, 1987].

8.1.2.5 Utilisation de la discrimination d'antenne

Si les trajets sont suffisamment inclinés ou présentent un dégagement naturellement important, les angles entre l'onde directe et l'onde réfléchie deviennent suffisamment grands pour tirer profit du diagramme de rayonnement d'une antenne – ou des deux antennes – et permettre une discrimination vis-à-vis de l'onde ou des ondes réfléchies. Même sans cet avantage lié au terrain, il est intéressant d'incliner une antenne ou les deux antennes légèrement vers le haut, afin d'accroître le pouvoir discriminant disponible. La procédure pas à pas mettant en œuvre ce principe est présentée dans la Recommandation UIT-R P.530. Elle tend à appliquer deux stratégies à la fois: la stratégie B ci-dessus et, dans une certaine mesure, la stratégie A. De toute évidence, les niveaux de réflexion de surface sont réduits du fait de la diminution des directivités des antennes dans la direction des réflexions.

Plusieurs publications fondées sur des mesures ([Hartman et Smith, 1977; Sasaki *et al.*, 1987; Satoh *et al.*, 1989 et Prasad *et al.*, 1991] entre autres) indiquent la valeur d'inclinaison vers le haut des antennes permettant d'améliorer les effets de propagation par trajets multiples de surface. Des mesures effectuées sur les trois rayons de plus forte intensité sur des trajets de 31, 41 et 51 km dans le centre-est de l'Amérique du Nord [Webster, 1991] confirment que l'inclinaison vers le haut permet une discrimination vis-à-vis des rayons en provenance de la surface et montrent que le rayon de plus forte puissance (normalement le rayon direct) arrive en général avec un angle positif dans des conditions de propagation par trajets multiples. La valeur approchée de l'angle d'arrivée fournie dans la Recommandation UIT-R P.530 [Karl et Persson, 1998] pour $k = \infty$ est en accord avec les valeurs les plus probables (c'est-à-dire les modes) déduites de ces mesures.

La Recommandation UIT-R P.530 fournit deux techniques complémentaires pour déterminer les angles d'inclinaison optimaux: la première consiste à réduire au minimum la profondeur maximale des évanouissements par trajets multiples de surface; la seconde consiste à réduire au minimum la distorsion d'amplitude. La première repose sur des équations bien connues de réflexion de surface [Boithias, 1983; Karl et Persson, 1998], sur une approximation des diagrammes de lobe principal des antennes par des faisceaux gaussiens [Olsen *et al.*, 1987] et sur notre compréhension actuelle de la physique de propagation par trajets multiples [Olsen *et al.*, 1987; Olsen, 1989 et Segal, 1999]. Il convient de noter cependant que cette technique n'est pas sensible aux situations physiques particulières qui sont simulées. La seconde repose sur une autre technique [Tanem, 1988], qui, appliquée à son plein potentiel, requiert la connaissance des diagrammes de rayonnement des antennes. Comme indiqué, si la diminution de la marge brute de protection contre les évanouissements obtenue en inclinant l'antenne d'émission et l'antenne de réception est limitée à 6 dB environ, il n'est pas nécessaire d'utiliser les diagrammes de rayonnement des antennes. Comme indiqué également, le choix d'utiliser une technique, l'autre, ou un compromis des deux, dépend des caractéristiques

du système. Les deux techniques sont cohérentes avec les observations de diversité angulaire émanant de plusieurs pays qui utilisent l'inclinaison d'antenne uniquement au niveau du récepteur [Sato *et al.*, 1989 et Sasaki *et al.*, 1991].

Il convient de noter que l'inclinaison vers le haut des antennes dans le but d'améliorer les effets de la propagation par trajets multiples de surface améliore également, dans la plupart des cas, les effets de la propagation par trajets multiples dans l'atmosphère. Ceci est étayé tant par des analyses de tracé de rayon [Webster, 1983] que par des analyses poussées de mesures d'amplitude et d'angle d'arrivée des trois rayons de plus forte intensité sur un trajet de 51 km dans le centre-est de l'Amérique du Nord [Webster *et al.*, 1994]. Ce phénomène s'explique par le fait que le plus puissant des deux rayons de trajets multiples dans l'atmosphère de plus forte intensité présente aussi en général l'angle d'arrivée le plus élevé. Par conséquent, si les antennes sont inclinées d'un angle supérieur à cet angle d'arrivée, il est très probable que la différence de niveau entre les deux rayons de trajets multiples dans l'atmosphère de plus de forte intensité augmente. Des mesures effectuées sur des trajets de 31, 41 et 51 km [Webster, 1991] montrent que le rayon de plus forte intensité présente en règle générale un angle d'arrivée inférieure à $0,3^\circ$. S'explique ainsi pourquoi la Recommandation UIT-R P.530 indique que l'inclinaison vers le haut doit normalement être optimisée de façon à améliorer les effets de la propagation par trajets multiples de surface.

8.1.3 Réduction du dégagement du trajet

Pour d'atténuer les effets des évanouissements par trajets multiples, l'une des meilleures techniques disponibles est peut-être celle consistant à réduire au minimum le dégagement du trajet. Les données scientifiques publiées à ce jour sont malheureusement rares [Olsen et Segal, 1992], la plupart des rapports publiés par les concepteurs de liaison provenant d'observations empiriques. Étant donné que la réduction du dégagement du trajet peut entraîner une augmentation des effets de l'affaiblissement par diffraction dans des conditions de sous-réfraction (voir § 3.3), cette technique est quelque peu risquée sur des trajets sans diversité d'espace, à moins que l'affaiblissement par diffraction ne puisse être estimé avec une précision acceptable.

Des techniques d'estimation de l'affaiblissement par diffraction ont été proposées pour certaines régions du globe. Leur utilisation permettrait de tolérer un certain niveau d'affaiblissement par diffraction [Giloi, 1979; Kalinin, 1979; Nadenenko, 1981; Vigants, 1981 et Olsen et Segal, 1992]. La règle de dégagement du trajet dont il est question au § 2.2.2.1 de la Recommandation UIT-R P.530 [Olsen et Segal, 1992] est conçue pour éviter un affaiblissement par diffraction dans des conditions de réfraction normales (c'est-à-dire une valeur médiane équivalente du facteur k) tout en permettant un affaiblissement par diffraction d'environ 6 dB dans des conditions correspondant à k_e (99,9%). Pour les systèmes présentant des marges brutes de protection contre les évanouissements suffisamment importantes, on pourrait en principe accepter un affaiblissement par diffraction plus important, tant dans des conditions normales que dans des conditions de sous-réfraction.

L'efficacité de cette technique s'explique, semble-t-il, par le fait que les trajets présentant un moindre dégagement ont en dessous d'eux potentiellement moins de couches superréfractives (conduits par exemple), ce qui diminue l'apparition d'affaiblissements importants par étalement du faisceau dans l'onde directe et, par conséquent, la probabilité d'interférences destructives avec les ondes réfléchies de surface [Olsen, 1989 et Olsen et Segal, 1992]. Si tel est le cas, cette technique tend à appliquer à la fois la stratégie A et la stratégie C susmentionnées. La réduction du décalage temporel de la réflexion au sol apparaîtrait principalement du fait d'une réduction de la composante principale du temps de propagation sous l'effet de la transmission bidirectionnelle dans la couche située sous le trajet, mais aussi, partiellement, du fait de la réduction de la composante géométrique du temps de propagation [Olsen *et al.*, 1987 et Olsen, 1989].

8.2 Techniques avec diversité

Si les techniques décrites dans la section précédente ne permettent pas d'atténuer les effets de la distorsion et des évanouissements par trajets multiples suffisamment pour réduire les interruptions estimées du faisceau à des niveaux acceptables, il est nécessaire d'utiliser des techniques faisant appel à la diversité. Ces techniques comprennent la diversité d'espace, la diversité angulaire, la diversité de fréquence et la diversité de polarisation. Comme indiqué dans la Recommandation UIT-R P.530, il convient d'éviter d'utiliser la diversité de fréquence chaque fois que cela est possible, afin d'économiser le spectre. Chaque fois que l'on utilise la

diversité d'espace, il est également recommandé de recourir à la diversité angulaire en dépointant les antennes vers le haut, à des angles différents. La diversité angulaire peut également être utilisée dans les situations où la diversité d'espace n'est pas envisageable ou pour réduire la hauteur des tours.

8.2.1 Diversité d'espace

Les systèmes mettant en jeu la diversité d'espace utilisent normalement deux antennes espacées verticalement à l'une des extrémités de la liaison. Des configurations avec espacement standard sont généralement suffisamment efficaces pour lutter contre les effets de la distorsion et des évanouissements par trajets multiples, mais d'autres configurations sont parfois utilisées pour les liaisons à problème. Certains ont ainsi proposé d'augmenter l'espace entre les antennes pour lutter plus efficacement contre les effets d'étalement des faisceaux et les évanouissements par trajets multiples de surface qui y sont associés [Olsen, 1989]. Des dégagements du trajet inférieur dans les limites proposées par la Recommandation UIT-R P.530 pour les antennes de diversité devraient en général permettre d'atteindre ce résultat. Dans le cas des liaisons pour lesquelles l'affaiblissement par étalement du faisceau est encore plus important, le recours à des antennes espacées aux deux extrémités de la liaison s'est révélé efficace [Boithias, 1979 et Hautefeuille *et al.*, 1980].

8.2.2 Espacement des antennes dans les systèmes à diversité d'espace

La Recommandation UIT-R P.530 fournit une procédure pas à pas permettant de déterminer l'espacement des antennes dans des systèmes à diversité d'espace composés de deux ou trois antennes. Cette procédure est un compromis entre:

- a) la nécessité de maintenir un dégagement aussi faible que possible pour l'antenne la moins élevée (conformément aux directives relatives au dégagement exposées au § 2.2.2 de la Recommandation UIT-R P.530) de façon à réduire au minimum l'occurrence des évanouissements dus à des trajets multiples de surface (voir le § 8.1.3);
- b) la nécessité d'obtenir un facteur spécifié d'amélioration de diversité d'espace pour les trajets terrestres (voir le § 8.2.2);
- c) la nécessité de réduire au minimum le risque qu'un signal parvenant à une antenne de diversité subisse un évanouissement par propagation en trajets multiples de surface lorsque l'autre antenne subit déjà un évanouissement.

Elle repose d'une part sur une procédure d'optimisation de l'espacement pour lutter contre la propagation par trajets multiples de surface [Karl et Persson, 1998] et d'autre part sur des connaissances relatives à la physique de ce type de propagation [Olsen *et al.*, 1987; Olsen, 1989; Webster, 1991; Rana *et al.*, 1993, 1995 et Segal, 1999]. L'approche adoptée dans le cas d'un bond à deux segments par réflecteurs passifs repose en partie sur des mesures à 6 GHz effectuées sur des segments de 50,7 km et 15,3 km [Vigants, 1975].

8.2.3 Espacement angulaire en diversité d'angle et systèmes combinant diversité d'espace et diversité angulaire

La diversité angulaire peut être réalisée en utilisant:

- a) une antenne multi-alimentation unique dotée de deux faisceaux ou plus, présentant un faible espacement angulaire dans le plan vertical;
- b) deux antennes séparées horizontalement et inclinées selon des angles différents dans le plan vertical;
- c) des antennes de diversité d'espace séparées verticalement et inclinées selon des angles différents dans le plan vertical.

Les faisceaux respectifs ont des effets discriminatoires différents selon l'angle d'arrivée des signaux par trajets multiples dans le plan vertical, ce qui explique pourquoi cette approche fonctionne. Ainsi, deux signaux par trajets multiples ou plus qui, en se combinant, créent des évanouissements profonds par trajets multiples sélectifs en fréquence sur l'un des faisceaux se combinent selon des ratios différents sur un autre faisceau, ce qui a toutes les chances de ne pas causer la même profondeur ni la même sélectivité d'évanouissement. Les approches a) et b) se révèlent utiles lorsqu'un système à diversité doit être installé sur

une tour existante et que la tour n'est pas assez haute pour permettre une diversité d'espace. Si l'amélioration obtenue par la diversité angulaire est suffisante, ces approches peuvent également être utilisées sur de nouvelles tours de façon à en réduire au minimum la hauteur. La technique à antenne unique présente un léger inconvénient: outre le coût plus élevé de l'antenne, l'espacement des faisceaux des antennes disponibles «sur étagère» peut ne pas être optimal pour le trajet considéré.

Pour maximiser la qualité de fonctionnement, il est conseillé de combiner la diversité angulaire à la diversité d'espace dès lors que cette dernière est utilisée. Ce principe se révèle particulièrement important dans le cas des trajets présentant des réflexions spéculaires de surface importantes. Cependant, étant donné que l'inclinaison des antennes pour obtenir une diversité angulaire correcte présente un coût, il est admis qu'on peut se limiter à la diversité d'espace sur les trajets pour lesquels, de toute évidence, celle-ci doit normalement suffire. Malheureusement, on dispose de peu de mesures concernant les systèmes combinant diversité d'espace et inclinaison des antennes [Satoh *et al.*, 1989; Vergeres *et al.*, 1990 et Sasaki *et al.*, 1991].

On trouve dans [Lin *et al.*, 1988] un historique et une analyse des résultats des toutes premières mesures effectuées et dans [Olsen, 1989] une analyse des mesures et de leur incidence en termes de physique de la propagation par trajets multiples. On ne compte seulement, depuis lors, que quelques autres mesures et analyses sur la diversité angulaire [Satoh *et al.*, 1989; Vergeres *et al.*, 1990 et Sasaki *et al.*, 1991; Tjelta *et al.*, 1991; Alley *et al.*, 1992; Di Zenobio *et al.*, 1992 et Danielsson et Johansson, 1993].

La Recommandation UIT-R P.530 présente une procédure permettant de déterminer les angles d'inclinaison des faisceaux des antennes dans le cas des approches b) et c). Cette procédure repose sur la totalité des résultats expérimentaux disponibles concernant l'état actuel de la théorie [Boithias, 1983; Tanem, 1988 et Karl et Persson, 1998] et les connaissances de la physique des trajets multiples [Olsen *et al.*, 1987; Olsen, 1989 et Segal, 1999]. À noter qu'une attention particulière a été portée à des expériences détaillées sur la diversité angulaire et la diversité d'espace mettant en jeu plusieurs angles d'inclinaison d'antenne [Dombek, 1986 et Valentin *et al.*, 1987, 1989 et 1990] et plusieurs trajets [Sasaki *et al.*, 1987; Satoh *et al.*, 1989; Valentin *et al.*, 1990 et Sasaki *et al.*, 1991], ainsi qu'à des analyses correspondantes des composantes d'évanouissement uniforme et d'évanouissement sélectif [Valentin *et al.*, 1990] ou à des simulations associées [Satoh *et al.*, 1989 et Sasaki *et al.*, 1991]. Une attention particulière a également été accordée à une série d'expériences sur le long terme concernant la mesure de différents angles d'arrivée et niveaux de signaux par trajets multiples sur cinq trajets différents au-dessus des terres et au-dessus de l'eau [Lam et Webster, 1985; Webster, 1991; Rana *et al.*, 1992, 1993 et 1995 et Webster *et al.*, 1994].

Le principe sur lequel repose la procédure permettant de déterminer l'angle d'inclinaison vers le haut d'un faisceau d'antenne est décrit au § 8.1.2.5. Deux techniques sont indiquées: l'une consiste à réduire au minimum la profondeur maximale des évanouissements; l'autre consiste à réduire au minimum la distorsion d'amplitude. Comme indiqué précédemment, les deux techniques sont cohérentes avec les observations de diversité angulaire émanant de plusieurs pays utilisant l'inclinaison d'antenne uniquement au niveau de la réception [Satoh *et al.*, 1989 et Sasaki *et al.*, 1991].

Des expériences consistant à extraire la composante des évanouissements uniformes du signal ont montré l'avantage que présente l'inclinaison de l'autre faisceau d'antenne vers le bas sur des trajets subissant des réflexions de surface suffisamment conséquentes, en vue d'apporter une protection par diversité supplémentaire dans des conditions d'évanouissements uniformes importants dus à l'étalement du faisceau de l'onde directe [Valentin *et al.* 1989 et 1990]. Ce principe est étayé par des analyses de tracé de rayon [Olsen *et al.*, 1987 et Sasaki *et al.* 1987] et par des observations montrant que la propagation par trajets multiples de surface est généralement accrue en cas d'évanouissements uniformes dus à l'étalement du faisceau de l'onde directe [Olsen *et al.*, 1987 et Rana *et al.*, 1992, 1993]. L'angle d'inclinaison dans la direction de la plus grande réflexion spéculaire est choisi de façon à maximiser la protection par diversité dans des conditions d'évanouissements uniformes importants. En outre, l'inclinaison du faisceau vers le bas présente l'avantage supplémentaire de réduire l'affaiblissement dû au découplage d'antenne, qui a lieu lorsqu'une onde directe arrive avec un angle négatif sous l'effet de la sous-réfraction [Olsen, 1989]. Comme indiqué dans la Recommandation UIT-R P.530, la limite à 3 dB prévue par la procédure de conception a pour objet d'éviter une trop grande diminution du niveau du signal direct (qui arrive normalement avec un angle positif dans des conditions de trajets multiples) parvenant dans le faisceau d'antenne incliné vers le bas, particulièrement lorsque la réflexion spéculaire dominante se produit immédiatement devant cette antenne.

Cela étant, l'inclinaison d'un faisceau d'antenne vers le bas présente un inconvénient: on sait en effet qu'il apparaît plus souvent sur ce faisceau des niveaux importants d'évanouissements sélectifs en fréquence et de distorsion du fait des niveaux plus élevés des signaux de propagation par trajets multiples qui arrivent de la surface du trajet [Valentin *et al.*, 1989 et 1990 et Vergeres *et al.*, 1990]. Il est toutefois peu probable que les évanouissements et la distorsion apparaissant sur ce faisceau se présentent simultanément sur le faisceau incliné vers le haut. En effet, le ratio entre le signal direct et le signal par trajets multiples de surface est nettement différent sur le faisceau incliné vers le haut. Étant donné que le faisceau incliné vers le bas rencontre plus souvent des niveaux élevés d'évanouissements et de distorsion, il est souhaitable de recourir à la commutation en diversité plutôt qu'à la combinaison en diversité.

En ce qui concerne les trajets sur lesquels il n'y a pas de réflexion spéculaire de surface manifeste, la décision d'incliner un faisceau vers le bas est plus difficile à prendre. Cela étant, il convient de souligner que la réflexion diffuse de surface, présente sur tous les trajets, peut augmenter alors même que le signal direct subit un évanouissement uniforme dû à l'étalement du faisceau. Par conséquent, si les signaux issus de la réflexion diffuse sont suffisamment intenses, il y a un risque d'évanouissements et de distorsion importants. En outre, certains éléments amènent à conclure qu'une propagation par trajets multiples en provenance de la surface du trajet peut se produire du fait de la réfraction par une fine couche de sous-réfraction au niveau de la surface [Segal, 1999]. Il est possible d'estimer la direction d'une telle réflexion en établissant une courbe de régression le long du profil du trajet, ou d'une partie du profil, et en supposant qu'il se produit une réflexion spéculaire. Les équations permettant de déterminer le point et l'angle de réflexion sont fournies dans la Recommandation UIT-R P.530.

8.2.4 Amélioration de la diversité d'espace dans les systèmes à bande étroite

La Recommandation UIT-R P.530 fournit une équation universelle permettant de prévoir le facteur d'amélioration de diversité d'espace I pour les systèmes à bande étroite. Cette équation, reposant principalement sur une fonction empirique approchant de données issues de la banque de données de l'UIT-R (voir Recommandation UIT-R P.311), adopte une approche prenant en compte les grandes variations d'évanouissements uniformes sous différents climats [Hosoya, 1991].

Une autre équation de prévision [CCIR, 1986-1990], un peu plus simple, a donné des résultats qui tendent vers ceux obtenus avec l'équation de la Recommandation UIT-R P.530 en termes de précision:

$$I = 1 + 1,3 \times 10^{-5} (S f)^{1,3} \cdot d^{1,5}/p \quad (126)$$

où:

p : pourcentage de temps pendant lequel la profondeur d'évanouissements A (dB) est dépassée

S : espacement vertical des antennes de réception de centre à centre (m)

f : fréquence (GHz)

d : longueur du trajet (km).

Cette équation repose sur des données correspondant aux intervalles de paramètres suivants: $2,1 < f < 6,2$ GHz, $50 < d < 240$ km, $63 < S/\lambda < 270$, où λ désigne la longueur d'onde. On trouvera de plus amples informations sur cette approche dans [Boithias, 1990].

Les résultats de plusieurs essais relatifs à ces deux méthodes ainsi qu'à d'autres approches utilisant les données de la banque de données de l'UIT-R figurent dans [Hosoya, 1991].

8.2.5 Diversité de fréquence

Tout en reconnaissant qu'il convient normalement de ne pas recourir aux systèmes à diversité de fréquence, la Recommandation UIT-R P.530 propose une procédure pas à pas pour déterminer l'espacement en fréquence dans de tels systèmes, lorsqu'ils présentent un intérêt pour des raisons de commodité ou de nécessité. Une étape de la procédure fournit l'espacement en fréquence optimal minimum, ainsi que les éventuels espacements en fréquence optimum plus larges, entre le canal principal et le canal de protection dans le cas de trajets avec des réflexions spéculaires de surface évidentes. Cette étape repose sur la même approche que celle utilisée pour établir la procédure permettant de calculer l'espacement des antennes dans les systèmes à diversité d'espace. Elle consiste à maximiser les chances que l'onde réfléchiée en surface la plus

importante soit en phase avec l'onde directe sur une fréquence et déphasée sur l'autre fréquence lorsqu'un évanouissement profond se produit. L'autre étape de la procédure, applicable aux trajets sans réflexion de surface, repose sur le calcul du facteur d'amélioration tiré de l'équation (107) de la Recommandation UIT-R P.530.

Comme le souligne cette Recommandation, un système à diversité de fréquence conçu de façon optimale n'offre pas une protection aussi bonne qu'un système analogue optimal à diversité d'espace. En effet, si le deuxième système bénéficie, comme le premier, de la protection due à la différence de phase entre les signaux dans le canal principal et dans le canal de protection, il bénéficie en plus de la protection apportée par l'espacement vertical des antennes contre la composante d'évanouissements uniformes résultant de l'affaiblissement par étalement du faisceau du signal direct. Ceci est particulièrement vrai si le dégagement du trajet de l'antenne de diversité est réduit selon la procédure indiquée au § 2.2.2.2 de la Recommandation. En principe, la diversité d'espace devrait également offrir une plus grande protection contre la propagation par trajets multiples dans l'atmosphère.

8.2.5.1 Facteur d'amélioration de diversité de fréquence pour les systèmes à bande étroite 1 + 1

Il existe peu de données disponibles à partir desquelles établir et tester une formule de prévision universelle pour le facteur d'amélioration de diversité de fréquence applicable aux systèmes à bande étroite 1 + 1.

On a souvent recours à l'équation suivante, applicable aux liaisons terrestres, du moins aux liaisons sur lesquelles il n'y a pas de réflexions au sol dominantes. Elle a été établie à partir des toutes premières données disponibles [Barnett, 1970 et Vigants, 1975].

$$I = (0,8 / f / d) (\Delta f / f) 10^{A/10} \quad (127)$$

où:

f : fréquence centrale de la bande (GHz)

d : longueur du trajet (km)

$(\Delta f / f)$: espacement de fréquence relatif (pourcentage)

A : profondeur des évanouissements (dB).

Cette équation s'applique uniquement aux intervalles de paramètres suivants:

$$2 \leq f \leq 11 \text{ GHz}$$

$$30 \leq d \leq 70 \text{ km}$$

$$\Delta f / f \leq 5\%.$$

À noter qu'une extrapolation peut entraîner des erreurs. On considère que l'équation n'est valide que pour des valeurs de $I \geq 5$.

Ci-dessous figure une autre équation de prévision, établie en combinant les toutes premières données disponibles avec d'autres données correspondant approximativement aux mêmes intervalles de paramètres que ceux de l'équation (127) [Boithias *et al.*, 1986]:

$$I = 1 + 0,015(1 / f) (\Delta f / f)^{1,25} \times 10^{A/10} \quad (128)$$

8.2.5.2 Facteur d'amélioration de diversité de fréquence pour les systèmes commutés multicanaux ($n + 1$) etc. à bande étroite

Le facteur d'amélioration de diversité applicable à un système analogique à diversité de fréquence $n + 1$ etc. peut être approché par la formule suivante, équivalente à celle de l'équation (128) [Vigants et Pursley, 1979]:

$$I = 160 (f / d \Gamma) \times 10^{A/10} \quad (129)$$

où:

f : fréquence centrale de la bande RF

Γ : paramètre dépendant des fréquences porteuses des canaux, de l'espacement des canaux et des marges de protection contre les évanouissements des différents canaux [Vigants et Pursely, 1979].

La signification des autres paramètres reste inchangée.

8.2.5.3 Exemples d'application

Exemple d'un trajet présentant une réflexion de surface importante: considérons une liaison de 10 km à 4 GHz reliant le haut d'un bâtiment à une colline en passant au-dessus d'un fleuve qui présente plus d'une première zone de Fresnel complète de réflexion à sa surface. L'antenne située sur le bâtiment se trouve à 57 m au-dessus du fleuve et l'antenne située sur la colline à 86 m. (La longueur et la largeur de la première zone de Fresnel à la surface de l'eau sont respectivement de 1,84 km et de 27 m. Voir la Recommandation UIT-R P.530.)

L'espacement en fréquence optimal minimum figure dans la dernière colonne du Tableau 5 pour plusieurs valeurs de k , avec les valeurs de plusieurs autres paramètres de la Recommandation susmentionnée, de façon à illustrer l'effet de la réflexion de surface sur les évanouissements lorsque l'onde directe subit un affaiblissement par étalement du faisceau du fait de la structure réfractive de l'atmosphère (on considère ici que la surface de l'eau est parfaitement lisse, avec $R_r = 1$). Les variables d'évanouissements A_{max} , A_{min} , et A proviennent de l'hypothèse selon laquelle le signal direct subit des évanouissements de $0,5 \times 4,4 = 2,2$ dB du fait de l'affaiblissement par étalement du faisceau et le signal réfléchi en surface est renforcé de la même valeur (c'est-à-dire que $L_{add} = 4,4$ dB) pour des ouvertures angulaires à mi-puissance des antennes de $2,7^\circ$. (A_{min} est le renforcement du signal global résultant des interférences constructives entre l'onde directe et l'onde réfléchie. La valeur est obtenue à partir des chiffres fournis dans la Recommandation UIT-R P.530, le signe négatif indiqué entre parenthèses étant remplacé par un signe positif. Les valeurs négatives correspondent à un renforcement.) On considère ici que les antennes ne sont pas inclinées vers le haut, mais cela apporterait à l'évidence une protection supplémentaire par rapport à la diversité de fréquence. À noter que l'espacement en fréquence optimal ne dépend que des longueurs de trajet d , d_1 , et d_2 et des hauteurs h_1 et h_2 des antennes au-dessus du fleuve, de sorte que cet exemple est valable à toutes les fréquences dès lors que l'ouverture angulaire à mi-puissance des antennes reste inchangée.

TABLEAU 5

Valeurs de l'espacement en fréquence optimal minimum et d'autres variables pour différentes valeurs de k

k	d_1 (km)	d_2 (km)	D	ρ	ρ_{eff}	L_s (dB)	A_{max} (dB)	A_{min} (dB)	A (dB)	Δf (MHz)
0,5	4,04	5,96	0,948	0,794	0,794	2,31	45,9	-3,8	-2,4	171,3
1	4,01	5,99	0,974	0,788	0,788	2,27	41,4	-3,8	-3,0	161,8
1,33	4,01	5,99	0,980	0,787	0,787	2,26	44,7	-3,8	-3,7	159,5
3	3,99	6,01	0,991	0,784	0,784	2,24	48,7	-3,8	2,2	155,8
5	3,99	6,01	0,995	0,784	0,784	2,24	49,8	-3,8	9,3	154,7
10	3,99	6,01	0,997	0,783	0,783	2,24	50,8	-3,8	49,6	153,8
100	3,99	6,01	1	0,782	0,782	2,23	51,8	-3,8	10,1	153,1
$1,0 \times 10^9$	3,99	6,01	1	0,782	0,782	2,23	52,0	-3,8	9,2	153,0

Comme indiqué dans la Recommandation UIT-R P.530, l'espacement en fréquence optimal minimum est d'environ 160 MHz, espacement réalisable dans la majorité des plans de fréquence. Un tel espacement du canal 2 permettrait d'éviter l'évanouissement profond qui se produit à 4 GHz dans le canal principal (50,8 dB

pour une valeur de k de 10 environ et $L_{add} = 4,4$ dB) et parallèlement de renforcer le signal dans le canal de diversité (environ 3,8 dB pour $L_{add} = 4,4$ dB), qui doit être centré sur 4,16 GHz ou 3,84 GHz environ.

Si la longueur du trajet était de 30 km au lieu de 10 km, l'espacement en fréquence optimal minimum serait de 692 MHz pour une valeur de k de 4/3. En principe, une diversité par fonctionnement en bandes croisées avec le canal de diversité situé à 6,076 GHz (c'est-à-dire trois fois l'espacement en fréquence optimal minimum tel que spécifié dans la Recommandation UIT-R P.530) permettrait de se protéger contre les évanouissements par trajets multiples dus à l'affaiblissement par étalement du faisceau du signal direct combiné à la réflexion de surface.

Exemple d'un trajet ne présentant pas de réflexion de surface évidente:

Soit un trajet de 30 km à 4 GHz, avec une marge brute de protection de 40 dB. Si l'espacement en fréquence souhaité dans un système donné est de 80 MHz, on peut utiliser le facteur d'amélioration pour les évanouissements non sélectifs $I_{ns} = 133,3$ de la Recommandation UIT-R P.530. On reporte ensuite cette valeur dans la méthode indiquée dans cette Recommandation pour obtenir une prévision de l'interruption de service. Si l'interruption estimée est trop importante, on peut envisager un espacement en fréquence plus élevé. Par exemple, un espacement de 160 MHz donnerait $I_{ns} = 266,7$.

8.2.6 Facteur d'amélioration de diversité de polarisation pour les systèmes à large bande

Lors de l'utilisation dans le même canal du spectre de fréquences, il est important de savoir s'il existe un effet de diversité et, le cas échéant, de le qualifier. En particulier, dans les systèmes qui fonctionnent en commutation de protection du type $(n + m)$, il convient de choisir les m canaux de protection les plus adaptés en fonction de leur fréquence dans la bande et de leur polarisation.

Des mesures ont montré que les événements d'évanouissement de la puissance moyenne de deux canaux à la même fréquence (V et H) sont extrêmement bien corrélés pour des valeurs d'évanouissement jusqu'à 25 dB au moins. L'amélioration apportée par la diversité de polarisation s'explique donc principalement par le fait que les dispersions dans les deux canaux à la même fréquence ne sont pas bien corrélées.

8.2.7 Avantages relatifs des différentes techniques faisant appel à la diversité et de leurs combinaisons

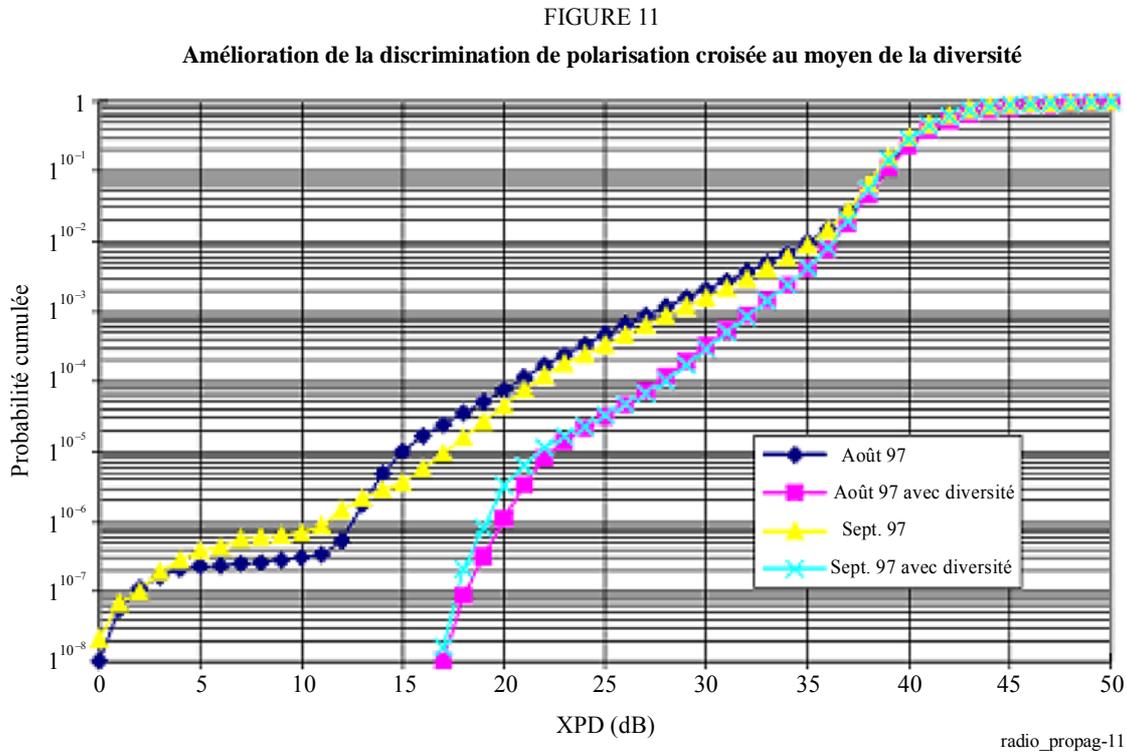
L'un des avantages majeurs de la diversité d'espace et de la diversité angulaire par rapport à la diversité de fréquence est de contribuer à la préservation du spectre de fréquences disponible.

Les comparaisons entre la diversité d'espace et la diversité angulaire sont encore embryonnaires. Les antennes uniques de diversité angulaire avec faisceaux multiples présentent des avantages évidents: coût réduit, charge limitée des tours et utilisation sur des pylônes trop courts pour la diversité d'espace. Pour ce qui concerne la qualité de fonctionnement relative des liaisons numériques, certains éléments semblent indiquer que les configurations normales de diversité d'espace apportent la plus grande amélioration de diversité sur les liaisons où prédominent les interruptions dues aux évanouissements uniformes et que les configurations de diversité angulaire apportent la plus grande amélioration de diversité sur les liaisons où prédominent les interruptions dues à la distorsion [Lin *et al.*, 1988; Alley *et al.*, 1987; Valentin *et al.*, 1989 et Mohamed *et al.*, 1989].

D'autres expériences ont consisté à combiner les différentes techniques de diversité. Les statistiques des évanouissements à une seule fréquence, de la XPD et de la différence de puissance dans la bande ont été grandement améliorées en combinant la diversité d'espace et la diversité angulaire au niveau de la réception dans une configuration où l'antenne supérieure n'était pas inclinée alors que l'antenne inférieure était inclinée vers le haut. Il a également été confirmé que la réception en diversité entre un faisceau non incliné et un faisceau orienté vers une onde réfléchi par la mer permet de réduire efficacement les évanouissements le long des trajets sur lesquels existent une onde réfléchi stationnaire de forte intensité et des étalements de faisceau fréquents [Sasaki *et al.*, 1987 et Satoh *et al.*, 1989].

8.3 Techniques de diversité visant à atténuer les diminutions de la XPD

La Fig. 11 présente un exemple des améliorations de la discrimination de polarisation croisée obtenues en recourant à la diversité. Les mesures indiquées correspondent aux mois les plus défavorables d'une année, pour une liaison de 122,4 km à 4 GHz en Suisse [Thorvaldsen, 2000].



Références

- ALLEY, G. D., BIANCHI, C. H. et ROBINSON, W. A. [1992] Angle diversity and space diversity experiments on the Salton/Browley hop. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. 40, 2, p. 440-454.
- ALLEY, G. D., PENG, W. C., ROBINSON, W. A. et LING, E. H. [1987] The effect on error performance of angle diversity in a high capacity digital microwave radio system. *IEEE GLOBECOM*.
- BARNETT, W. T. [October 1970] Microwave line-of-sight propagation with and without frequency diversity. *BSTJ*, Vol. 49, 8, p. 1827-1871.
- BARNETT, W. T. [1972] Multipath propagation at 4, 6 and 11 GHz. *BSTJ*, Vol. 51, 2, p. 311-361.
- BASHIR, S. O. et McEWAN, N. J. [June 1986] Microwave propagation in dust storms: A review. *Proc. Inst. Elect. Eng.*, Vol. 133, p. 241-247.
- BATTESTI, J. et BOITHIAS, L. [1978] 6th Colloquium on Microwave Communications, Budapest, Hongrie.
- BECKMANN, P. et SPIZZICHINO, A. [1963] *The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces*, Ed. Pergamon Press.
- BERTOK, E., DERENZIS, G. et DRUFUCA, G. [1977] Estimate of attenuation due to rain at 11 GHz from rain gauge. *CNET, Issy-les-Moulineaux, France*, p. 295-300.

- BOITHIAS, L. [1979] Protection contre les évanouissements dus aux conduits troposphériques sur les liaisons en visibilité. *Ann. des Télécomm.*, Vol. 34, **9-10**, p. 513-514.
- BOITHIAS, L. [1981] Distribution statistiques des niveaux reçus en propagation par trajet multiple troposphérique. *Ann. des Télécomm.*, Vol. 36, **5-6**, p. 329-337.
- BOITHIAS, L. [1983] *Propagation des ondes radioélectriques dans l'environnement terrestre*. Ed. Dunod.
- BOITHIAS, L. [1987] *Radio Wave Propagation* (translated by D. Beeson). Ed. McGraw-Hill.
- BOITHIAS, L. [1989] Similitude en fréquences pour l'affaiblissement par la pluie. *Ann. des Télécomm.*, Vol. 44, **3-4**, p. 186-191.
- BOITHIAS, L. [1990] La réception en diversité sur les liaisons de télécommunications. *L'Onde Electrique*, Vol. 70, **1**, p. 65-75.
- BOITHIAS, L. et BATTISTI, J. [1967] Protection against fading on line-of-sight radio-relay systems (in French). *Ann. des Télécomm.*, Vol. 22, **9-10**, p. 230-242.
- BOITHIAS, L., BATTISTI, J. et ROORYCK, M. [1986] Prediction of the improvement due to diversity reception in microwave links. Proc. MICROCOLL '86, Budapest, Hongrie.
- BULLINGTON, K. [1971] Phase and amplitude variations of multipath fading of microwave signals relating to atmospheric irregularities. *BSTJ*, Vol. 50, p. 2039-2053.
- CAPSONI, C., FEDI, F. et PARABONI, A. [1987] A comprehensive meteorologically oriented methodology for the prediction of wave propagation parameters in telecommunication applications beyond 10 GHz. *Radio Sci.*, Vol. 22, p. 387-393.
- CHU, T. [1974] Rain-induced crosspolarization at centimeter and millimeter wavelengths. *BSTJ*, Vol. 53, **8**, p. 1557-1539.
- COST [1996] COST 235 – Radiowave propagation effects on next-generation fixed-services terrestrial telecommunication systems. Commission européenne, EUR 16992 EN, ISBN 92-827-8023-6.
- CRANE, R. K. [1976] *Refraction effects in the neutral atmosphere. Methods Experimental Physics*, Vol. 12B. M. L. Meeks, Ed. Academic Press.
- CRANE, R. K. [October 1979] Automatic cell detection and tracking. *IEEE Trans. Geosci. Electron.*, Vol. 17, Issue: 4.
- CRANE, R. K. [1980] Prediction of attenuation by rain. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. 28, p. 1717-1733.
- CROMBIE, D. C. [1984] Prediction of multipath fading on terrestrial microwave links at frequencies of 11 GHz and greater. NATO/AGARD Conf. Proc. CP-346, p 10/1-8. North Atlantic Treaty Organization, Paris, France.
- DANIELSSON, B. et JOHANSSON, U. [1993] Measured improvements using angle and space diversity on a terrestrial microwave radio link. IEE Conf. Publ. No. 386 on Radio Relay Systems, p. 215-220.
- DERENNES, M. [1979] Etude statistique sur des trajets multiples. Note techniques CNET-TCR/APH/60. Centre national d'études des télécommunications, Issy-les-Moulineaux, France.
- DI ZENOBIO, D., SANTELLA, G., CANDEO, S. et MANDICH, D. [1992] Angle and Space Diversity: Experimental Comparison. Conf. IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM'92), Conf. Rec., Orlando, États-Unis d'Amérique, p. 1851-1857.
- DISSANAYAKE, A. et ALLNUTT, J. E. [1992] Interpretation of radiometric measurements of sky-noise in terms of path attenuation. Proc. ICAP 1991, p. 374-378.
- DOMBEK, K. P. [1986] Reduction of multipath interference by adaptive beam orientation. Proc. European Conf. on Radio-Relay Systems, p. 400-106.
- DRUFUCA, G. [1974] Rain attenuation statistics for frequencies above 10 GHz from rain gauge observations. *J. Rech. Atmos.*
- FEDI, F., MERLO, U., et MIGLIORINI, P. [1977] Effect of the rain rate profile along a path on rain induced attenuation. Proc. URSI Open Symposium on Propagation in Non-ionised Media, La Baule, France.

- FEHLHABER, L. [1976] Influence of the path geometry on fading on line-of-sight radio-relay paths (in German). *Techn. Ber. FTZ*, A 455 TBr 59.
- FIMBEL, J. et JUY, M. [April 28-May 6, 1977] Differential attenuations at 13 GHz over 53 km - Comparison with simultaneous measurements at 20.5 GHz. Proc. Union Radio Scientifique Internationale, Open Symposium, La Baule, Loire-Atlantique, France.
- GARCIA LOPEZ, J. A. et PEIRO J. [1983] Simple rain attenuation prediction technique for terrestrial radio links. *Electron. Lett.*, Vol. 19, p. 879-881.
- GAVZILINA, V. D., KALININ, A. I., DADENENKO, L. V., PANOVA, R. K., SVJATOGOZ, V. V. et UDINA, T. A. [1986] The influence of multipath propagation on the performance characteristics of line-of-sight radio relay channels (in Russian). NIIR Proc., N1.
- GHOBRIAL, S. I. et SHARIEF, S. M. [April 1987] Microwave attenuation and cross polarization in dust storms. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-35, p. 418-425.
- GIBBINS, C. J. et WALDEN, C. J. [2003] A study into the derivation of improved rain attenuation regression coefficients. Radiocommunications Agency Report No. AY4359, disponible à l'adresse <http://www.radio.gov.uk/topics/research/research-index.htm>.
- GILOI, H. G. [1979] Diffraction phenomena during multipath. AGARD Conf. Proc. No. 269, p. 32-1-32-14.
- GOSSARD, E. E. [1977] Refractive index variance and its height distribution in different air masses. *Radio Sci.*, **12**, p. 89-105.
- GUTTEBERG, O. [1983] Low elevation propagation in high-latitude regions. Telenor R&D Report No 7/83.
- HARDEN, B. N., NORBURY, J. et WHITE A. [1978] Use of a lognormal distribution of raindrop sizes in millimetric radio attenuation studies. IEE Conf. Publ 169, Part 2, p. 87-91.
- HARTMAN, W. J. et SMITH, D. [1977] Tilting antennas to reduce line-of-sight microwave link fading. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. 25, **5**, p. 642-645.
- HAUTFEUILLE, M., BOYLE, A. W., TIMMERS, A. G. W., et SHANNON, J. D. [1980] Duct fading – is Senegal an isolated case? *Telecomm. J.*, Vol. 47, **VIII**, p. 517-525.
- HENDRY, A., ANTAR, Y. M. M., SCHLESACK, J. J. et OLSEN, R. L. [1981] Melting layer attenuation at 28.6 GHz from simultaneous Comstar beacon and polarisation diversity data. *Electron. Lett.*, **17(5)**, p. 190-191.
- HOSOYA, Y. [1991] A unified prediction method for space diversity improvement in received power on microwave links. *Electronics and Communications in Japan*. Part 1, Vol. 74, **9**, p. 73-81. Translated from Denshi Joho Tsushin Gakkai Ronbunshi, Vol. 73-B-II, **12**, décembre 1990.
- JAIN, Y. M. et WATSON, P. A. [1985] Attenuation in melting snow on microwave- and millimetre-wave terrestrial radio links. *Electron. Lett.*, **21(2)**.
- KALININ, A. I. [1979] Rasprostranenie radiovoln na trassakh nazemnykhi kosmicheskikh radioliny (Propagation on terrestrial and space links). *Sviáz*, Moscou, URSS.
- KARL, H. et PERSSON, R. [1998] The Planning and Engineering of Radio Systems. *K&K Engineering*, Stockholm, Suède.
- KHARADLY, M., OWEN, N. VAN DER STAR, J., MICHELSON, D. et ENEGREN, T. [1983] Observations of abnormal microwave propagation phenomena during melting layer conditions. Proc. of International Conference on Antennas and Propagation (ICAP), Norwich, Royaume-Uni.
- KHARADLY, M. M. Z. et OWEN, N. [1988] Microwave propagation through the melting layer at grazing angles of incidence. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, **36(8)**.
- KOBAYASHI, T. [July 1977] Degradation of cross-polarization isolation due to rain. *Radio Res. Lab. J.*, Vol. 24, p. 101-107.
- KUZNETSOV, G. G., WALDEN, C. J. et HOLT, A. R. [2000] Attenuation of microwaves in sleet. Final Report to the Radiocommunication Agency AY 3564, Dep. of Mathematics, University of Essex, Colchester (disponible à l'adresse <http://www.ofcom.org.uk/>).

- LAM, W. I. et WEBSTER, A. R. [1985] Microwave propagation on two line-of-sight overseas paths. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. 33, **5**, p. 510-516.
- LIN, S. H. [1971] Probability amplitude analysis of statistical behaviour of fading signal envelope. *BSTJ*, Vol. 50, p. 3211-3270.
- LIN, S. H. [1975] A method for calculating rain attenuation distributions on microwave paths. *BSTJ*, **54**, p. 1051-1086.
- LIN, S. H., LEE, T. C. et GARDINA, M. F. [1988] Diversity protections for digital radio – A review. SMBO Int. Microwave Symp. Proc., Vol. II, p. 1175-1182.
- MARTIN, L. [1983] Rates of change of propagation medium transfer functions during selective fading. Proc. URSI (Commission F) International Symposium on wave propagation and remote sensing, Louvain-la-Neuve, Belgique.
- MARTIN, L., GIRAUD, B. et BOUIDENE, A. [1993] General computation method of outage time for digital radio links. *Electron. Lett.*, Vol. 29, **22**, p. 1913-1914.
- McEWAN, N. J., BASHIR, S. O., CONNOLLY, C. et EXCELL, D. [1985] The effect of sand and dust particles on 6/4 and 14/11 GHz signals on satellite-to-Earth paths. University of Bradford, Report 379.
- MEDHURST, R. [1965] Rainfall attenuation of centimeter waves: Comparison of theory and measurement. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, p. 550- 564.
- 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. *Proc. IEE*, Vol. 131, Pt. H, 2, p. 114-116.
- MINKIN, V. M. et NADENENKO, L.V. [1998] Influence of propagation conditions on the bringing into service procedure for digital radio-relay systems. Proc. of 6th ECRR' 98, Bergen, Norvège.
- MISME, P. et FIMBEL, J. [1975] Theoretical and experimental determination of rain-induced attenuation on a radioelectric path. *Ann. des Télécomm.*, Vol. 30, p. 149-158.
- MOHAMED, S. A. RICHMAN, G. D., et HUIISH, P. W. [198] Results of angle diversity trials by British Telecom. Proc. 2nd European Conference on Radio-Relay Systems.
- 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. IEICE TRANS. (1976-1990), Vol. 61, **6**, p. 425-432.
- MORITA, K. SHIMBA, M. et AKEYAMA, A. [May 1974] Radio propagation characteristics due to rain at 20-GHz band. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. 22, **5**, p. 507-509.
- MOUPFOUMA, F. [1984] Improvement of a rain attenuation prediction method for terrestrial microwave links. *IEEE Tran. Ant. Prop.*, Vol. 32, p. 1368-1372.
- NADENENKO, L.V. [1981] Raschet trass radioreleinykh liny pryamoi vidimosti (Calculations for line-of-sight radio relay paths). Spravochnik po radioreleinoi svyazi. *Radio I Sviaz*, Moscou, Fédération de Russie.
- NADENENKO, L. V. et SVIATOGOR, V. V. [1972] Dlitelnost zamiraniy signala na intervalakh radioreleynikh linyi pryamoy vidimosti (Durée des évanouissements de signal dans les bonds de faisceaux hertziens à visibilité directe) (en russe). *Elektrosviaz*, **5**, p. 6-10.
- NISHITSUJI, A. [1971] Method of calculation of radio-wave attenuation in snowfall. *Electronics and communications in Japan*, 54-B(1).
- NOWLAND, W. L., OLSEN, R. L. et SHKAROFSKY, I. P. [October 1977] Theoretical relationship between rain depolarisation and attenuation. *Electron. Lett.*, Vol. 13,**22**, p. 676-678.
- OLSEN, R. L. [1981] Cross-polarisation during precipitation on terrestrial links. *Radio Sci.*, Vol. 16, **5**, p. 761-779.
- OLSEN, R. L. [1989] The role of atmospheric stratification and surface effects in multipath propagation over terrestrial line-of-sight links: A review of some recent results. SMBO Proc. Int. Microwave Symp., São Paulo, Brésil, p. 401-408.
- OGUCHI, T. [1973] Attenuation and phase rotation of radio-waves due to rain: Calculation of 19.3 and 34.8 GHz. *Radio Sci.*, Vol. 8, p. 51-58.
- OGUCHI, T. [1977] Scattering properties of Pruppacher-and-Pitter form raindrops and cross-polarization due to rain: calculations at 11,13, 19-3 and 34-8 GHz. *Radio Sci.*, 12, p. 41-51.

- OGUCHI, T. et HOSOYA, Y. [1974] Differential attenuation and differential phase shift of radio waves due to rain: Calculations of microwave and millimeter wave regions. *J. Rech. Atmos.*, Vol. 8, p. 121-128.
- OLSEN, R. L. [Septembre-octobre 1981] Cross polarization during precipitation on terrestrial links: A review. *Radio Sci.* Vol. 16, p. 761-779.
- OLSEN, R. L. [1989] The role of atmospheric stratification and surface effects in multipath propagation over terrestrial line-of-sight links: A review of some recent results. Proc. SBMO International Microwave Symposium, São Paulo, Brésil, p. 401-408.
- OLSEN, R. L. et SEGAL, B. [1992] New techniques of predicting the multipath fading distribution on VHF/UHF/SHF terrestrial line-of-sight links in Canada. *Can. J. Elect. & Comp. Eng.*, Vol. 17, **1**, p. 11-23.
- OLSEN, R. L. et TJELTA, T. [1999] Worldwide techniques for predicting the multipath fading distribution on terrestrial L.O.S. links: Background and results of tests. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. 47, **1**, p. 157-170.
- OLSEN, R. ROGERS, D. et HODGE, D. [1978] The aRb relation in the calculation of rain attenuation. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. 26, **2**, p. 318-329.
- OLSEN, R. L., MARTIN, L. et TJELTA, T. [1987] A review of the role of surface reflection in multipath propagation over terrestrial microwave links. Proc. of NATO/AGARD Symposium on Terrestrial propagation characteristics in modern systems of communications, surveillance, guidance and control, No. CP407, p. 2/1-23.
- OLSEN, R. L., TJELTA, T., MARTIN, L. et SEGAL, B. [Janvier 2003] Worldwide techniques for predicting the multipath fading distribution on terrestrial L.O.S. links: comparison with regional techniques. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. 51, **1**, p. 23-30.
- PEARSON, K. W. [1965] Method for the prediction of the fading performance of a multisection microwave link. Proc. Inst. Elec. Eng., Vol. 112, p. 1291-1300.
- PERONI, B. et FEDI, F. [1974] The calculation of the hop length of digital radio relay systems at frequencies above 10 GHz. *Alta Frequenza*, Vol. 43, p. 634-639.
- PRASAD, M. V. S. N., DUTTA, H. N., SARKAR, S. K. et REDDY, B. M. [1991] Fading reduction in microwave LOS links using antenna beam tilting techniques. *Radio Sci.*, Vol. 26, **3**, p. 751-758.
- PRUPPACHER, H. R. et BEARD, K. V. [1970] A wind-tunnel investigation of the internal circulation and shape of water drops falling at terminal velocity in air. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, Vol. 96, p. 247-256.
- PRUPPACHER, H. R. et PITTER, R. L. [1971] A semi-empirical determination of the shape of cloud and rain drops. *Atmos. Sci.*, 28, p. 86-94.
- RANA, D., WEBSTER, A. R. et SYLVAIN, M. [1992] Statistical characterization of line-of-sight microwave links. *Radio Sci.*, Vol. 27, **6**, p. 783-796.
- RANA, D., WEBSTER, A. R. et SYLVAIN, M. [1993] Origin of multipath fading on a terrestrial link. *Ann. des Télécomm.*, Vol. 48, **11-12**, p. 557-566.
- RANA, D., WEBSTER, A. R. et SYLVAIN, M. [1995] Surface reflection at low-angle propagation *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. 43, **7**, p. 639-652.
- ROORYCK, M. et BATTISTI, J. [1976] Experimental investigation of a link at 13 GHz on 53 km: Attenuation and cross polarization. ESA Probl. of Space and Terrest. Microwave Propagation, p. 217-227.
- RUMMLER, W. D. [10-14 June 1978] A multipath channel model for line-of-sight digital radio systems. IEEE International Conference on Communications (ICC'79), Boston, États-Unis d'Amérique, Vol. 2, p. 32.2.1-5.
- RYDE, J. W. et D. RYDE [1945] Attenuation of Centimetre and Millimetre Waves by Rain, Hail, Fogs, and Clouds. Rpt. No. 8670, Research Laboratory of the General Electric Company, Wembley, Angleterre.
- SALEH, A. A. M. et VALENZUELA, R. A. [1987] A Statistical Model for Indoor Multipath Propagation. *IEEE J. Selected Areas Comm.*, Vol. 5, **2**, p. 128-137.
- SALOUS, S. et BAJJ, N. [1998] Urban wideband measurements at 1.8 GHz with different chirp bandwidths. 48th IEEE Vehicular Technology Conference, Vol. 1, **18-21**, p. 697-701.
- SASAKI, O., HOSOYA, Y. et YOSHIKAWA, M. [1987] A tilted-beam diversity reception system to reduce line-of-sight microwave fading. *Trans. Inst. Electron. Comm. Engrs.*, Vol. 70-B, **10**, p. 1251-1253.

- SASAKI, O., MORITA, K. et KIKUSHIMA, M. [1976] 19 GHz rain attenuation characteristics on four tandem links. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. 24, 2, p. 216-220.
- SASAKI, O., SATOH, A. et HOSOYA, Y. [1991] Multiple diversity reception techniques. *NTT Rev.*, Vol. 3, 1, p. 66-74.
- SATOH, A. et SASAKI, O. [1989] Tilted-beam-, beam-width- and space-diversity improvements on various paths. IEEE Global Telecommunications Conf. (GlobeCom'89), p. 2.3.1.
- SATOH, A., SASAKI, O. et HOSOYA, Y. [1989] Improvement of in-band dispersion by beam tilting on radio links with strong ground reflection. Proc. Int. Symp. on Antennas and Propagation (ISAP'89), p. 1073-1076.
- SAUNDERS, M. I. [1971] Cross polarisation at 18 and 30 GHz due to rain. *IEEE Trans.*, Vol. AP-19, p. 273-277.
- SCHIAVONE, J. A. [1981] Prediction of positive refractivity gradient for line-of-sight microwave radio paths. *BSTJ*, Vol. 60, 6, p. 803-822.
- SEGAL, B. [1979] High-intensity rainfall statistics for Canada. Commun. Res. Centre, Ottawa, Ontario, Canada, 1329-E.
- SEGAL, B. [1982] Rain Attenuation Statistics for Terrestrial Microwave Links in Canada. Comm. Res. Centre. Rep. No. 1351-E, Ottawa, Canada, p. 14.
- SEGAL, B. [1999] Multipath propagation mechanisms deduced from tower-based meteorological measurements. Proc. First International Workshop on Radiowave Propagation Modelling for SatCom Services at Ku-Band and Above, European Space Agency, Report No. 146, p. 13-18, Noordwijk (Pays-Bas).
- SETZER, J. E. [1970] Computed transmission through rain at microwave and visual frequencies. *BSTJ*, Vol. 49, p. 1873-1892.
- SHAFI, M. [Avril 1987] Statistical Analysis/Simulation of a Three Ray Model for Multipath Fading with Applications to Outage Prediction, IEEE Journal on Selected Areas on Communication, Special issue on Advances in Digital Communications.
- SILVA MELLO, L. A. R., GARCIA, N. A. P. et PONTES, M. S. [2005] Measurements and Prediction of Differential Rain Attenuation in Converging Links. *Electron. Lett.*, Londres, Vol. 41, 17, p. 942-942.
- STEPHANSEN, E. et MOGENSEN, G. [1979] Experimental Investigation of Some Effects of Multipath Propagation on a Line-of-Sight Path at 14 GHz. *IEEE Trans. Comm.*, Vol. 27, 3, p. 643-647.
- TAKADA, M. et NAKAMURA, S. [Janvier 1966] Attenuation of 11 Gc Waves by Wet Snowfall. *Rev. Elec. Comm. Labs.*, 14(1-2), p. 27-42.
- TANEM, T. [1988] Forbedring av transmisjonskvaliteten i digital radiolinjesystemer over sjøhopp ved optimal tilting av antennene (en norvégien). *Telektonikk*, Nr. 2/3. Traduction anglaise disponible auprès de l'auteur, Telenor, Oslo, Norvège.
- TATARSKII, V. I. [1967] *Wave Propagation in the Turbulent Atmosphere*. Nauka, Moscou, Fédération de Russie.
- THORVALDSEN, P. [2000] Co-channels everywhere. Proc. of ECRR 2000.
- THURAI, M. et WOODROFFE, J. M. [1997] Precipitation induced co and cross-polar effects from a 9 km link operating at 38 GHz. Proc. of International Conference on Antennas and Propagation (ICAP), Conf. Publ. No. 436, 2, p. 222-225.
- TJELTA, T., BRÅTEN L. E. et BACON D. [2005] Predicting the attenuation distribution on line-of-sight radio links due to melting snow. Proc. ClimDiff, Cleveland, États-Unis d'Amérique.
- TJELTA, T., BRÅTEN L. E. et BREIVIK, T. O. [2006] Predicting the attenuation distribution on line-of-sight radio links due to melting snow. Telenor R&D Scientific. Doc. N 35/2005.
- TJELTA, T., HAYTON, T. G., SEGAL, B. et SALONEN, E. [1998] Correlation of observed multipath occurrence with climatic parameters derived from radiosondes, surface stations, and numerical atmosphere models. Proc. of URSI Commission F Symposium on Climatic Parameters in Radiowave Propagation, Ottawa, Canada, p. 85-92.
- TJELTA, T., NYSETH, A. et LIND, K. [1991] Simultaneous measurements of angle and space diversity improvement on a line-of-sight microwave link in Norway. Proc. 3rd European Conf. on Radio Relay Systems (ECRR).

- TJELTA, T. et OLSEN, R. L. [2-5 juin 1998] Further development of methods for worldwide prediction of terrestrial radio link multipath fading distributions. Proc. of ECRR'98, Bergen, p. 330-335.
- TJELTA, T., OLSEN, R. L. et MARTIN, L. [1990] Systematic development of new multivariable techniques for predicting the distribution of multipath fading on terrestrial microwave links. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. 38, **10**, p. 1650-1665.
- TJELTA, T. et TANEM, T. [1992] Measured and predicted enhancement on line-of-sight microwave links. URSI Comm. F Symposium, p. 9.1.1-6.
- VALENTIN, R., GILOI, H. G. et METZER, K. [1989] Space diversity versus angle diversity – Results of system analysis using propagation data. IEEE Int. Conf. Comm. (ICC'89).
- VALENTIN, R., GILOI, H. G. et METZGER, K. [1990] More on angle diversity for digital radio links.
- VALENTIN, R., METZGER, K., GILOI, H. G. et DOMBEK, K. P. [1987] Effects of angle diversity on the performance on line-of-sight digital radio-relay systems. IEEE Global Telcom. Conf. (Globecom'87), p. 1229-1232.
- VERGERES, D., JORDI, P. et LOEMBE, A. [1990] Simultaneous error performance of antenna pattern diversity and vertical space diversity on a 64 QAM-radio link. IEEE Global Telecom. Conf. (GLOBECOM'90), Conf. Rec., Vol. 2, p. 817-82 (voir aussi Bulletin Technique PTT, Swiss PTT, Berne, Suisse, 1, 28-33, 1991).
- VIGANTS, A. [1971] Number and duration of fades at 6 and 4 GHz. *BSTJ*, Vol. 50, p. 815-841.
- VIGANTS, A. [1975] Space-diversity engineering. *BSTJ*, Vol. 54, **1**, p. 103-142.
- VIGANTS, A. [1981] Microwave radio obstruction fading. *BSTJ*, Vol. 60, **6**, p. 785-801.
- VIGANTS, A. et PURSLEY, M. V. [1979] Transmission unavailability of frequency-diversity protected microwave FM radio systems caused by multipath fading. *BSTJ*, Vol. 58, **8**, p. 1279-1796.
- WALDEN, C. J., WILSON C. L., GODDARD J. W. F., PAULSON K. S., WILLIS M. J. et EASTMENT J. D. [2003] A study of the effects of melting snow on communications links in Scotland. Proc. International Conference on Antennas and Propagation (ICAP).
- WATSON, P. A. [septembre 1976] Survey of measurements of attenuation by rain and other hydrometeors. *Proc IEE*, Vol. 123, **9**, p. 863-71.
- WEBSTER, A. R. [1983] Angle-of-arrival and delay times on terrestrial line-of-sight microwave links. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. 31, **1**, p. 12-17.
- WEBSTER, A. R. [1991] Multipath angle-of-arrival measurements on microwave line-of-sight links. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. 39, **6**, p. 798-803.
- WEBSTER, A. R., TIEU, T. et WONG, W. [1994] Simultaneous experimental studies of tropospheric microwave propagation. Dept. Electrical Engineering, University of Western Ontario, London, Ontario, Canada, Report CRC-CR-94-003.
- YAMADA, M., KARASAWA, Y. et YASUNAGA, M. [1987] An improved prediction method for rain attenuation in satellite communications operating at 10-20 GHz. *Radio Sci.*, Vol. 22.

Textes UIT-R

- Recommandation UIT-R P.1510 (2001), Température annuelle moyenne de surface.
- Recommandation UIT-R P.311-10 (2001), Acquisition, présentation et analyse des données dans les études relatives à la propagation troposphérique.
- Recommandation UIT-R P.581-2 (1990), Notion de «mois le plus défavorable».
- Recommandation UIT-R P.618-8 (2003), Données de propagation et méthodes de prévision nécessaires pour la conception de systèmes de télécommunication Terre-espace.
- Recommandation UIT-R P.676-5 (2001), Affaiblissement dû aux gaz de l'atmosphère.
- Recommandation UIT-R P.835-3 (1999), Atmosphère de référence pour l'affaiblissement dû aux gaz.
- Recommandation UIT-R P.836-2 (2001), Vapeur d'eau: concentration à la surface de la Terre et contenu total d'une colonne d'air.

Recommandation UIT-R P.837-4 (2003), Caractéristiques des précipitations pour la modélisation de la propagation.

Recommandation UIT-R P.838-3 (2005), Modèle d'affaiblissement linéique dû à la pluie destiné aux méthodes de prévision.

Recommandation UIT-R P.839-3 (2001), Modèle d'altitude de pluie pour les méthodes de prévision.

Recommandation UIT-R P.840-3 (1999), Affaiblissement dû aux nuages et au brouillard.

Recommandation UIT-R P.841-2 (2001), Conversion des statistiques annuelles en statistiques pour le mois le plus défavorable.

Recommandation UIT-R P.676-3 (1997), Affaiblissement dû aux gaz de l'atmosphère.

UIT-R [2002] Development towards a model for combined rain and sleet attenuation. Document 3M/62E.

UIT-R [1996] Manuel *Faisceaux hertziens numériques*. Bureau des radiocommunications, Genève.

UIT-R [1996] Manuel *Radiométéorologie*. Bureau des radiocommunications, Genève.

CCIR [1986-1990] Doc. 5/287 (France).

PARTIE 2

LIAISONS TRANSHORIZON

1 Introduction

Cette partie du Manuel concerne la planification et la conception des faisceaux hertziens transhorizon. Élaborée à partir des Recommandations UIT-R P.526 et UIT-R P.617, elle apporte des informations de base sur les différentes méthodes de prévision des pertes par diffraction et par diffusion troposphérique, ainsi que des données et d'autres renseignements tirés de ces Recommandations. On trouvera notamment une brève présentation des principes mathématiques et empiriques sur lesquels reposent ces méthodes ainsi que des renvois aux références qui y sont associées.

2 Applications classiques

Les liaisons radioélectriques transhorizon se caractérisent par de très longs trajets, classiquement compris entre 100 km et quasiment 1 000 km. Il en résulte un affaiblissement très important sur le trajet, qui doit être compensé par une très forte puissance rayonnée RF, des antennes de gain élevé et des récepteurs sensibles à faible bruit. En outre, il peut être utile de recourir à une certaine forme de diversité. Les fréquences utilisées se situent dans les bandes décimétriques et centimétriques inférieures.

Dans certains cas, les systèmes transhorizon, parce qu'ils permettent de se passer de répéteurs, peuvent constituer une solution plus économique qu'une liaison radioélectrique conventionnelle à visibilité directe. Cet avantage est particulièrement appréciable dans des conditions de terrain difficiles, notamment pour connecter des sites éloignés en zone rurale ou pour relier le continent et des îles distantes (ou plusieurs îles entre elles) ou le continent et des plates-formes pétrolières très éloignées du rivage.

De plus, étant donné le faible nombre de stations de répéteurs à protéger, les liaisons transhorizon présentent peu de prise aux sabotages et aux sinistres, ce qui explique en grande partie pourquoi l'armée leur porte un grand intérêt.

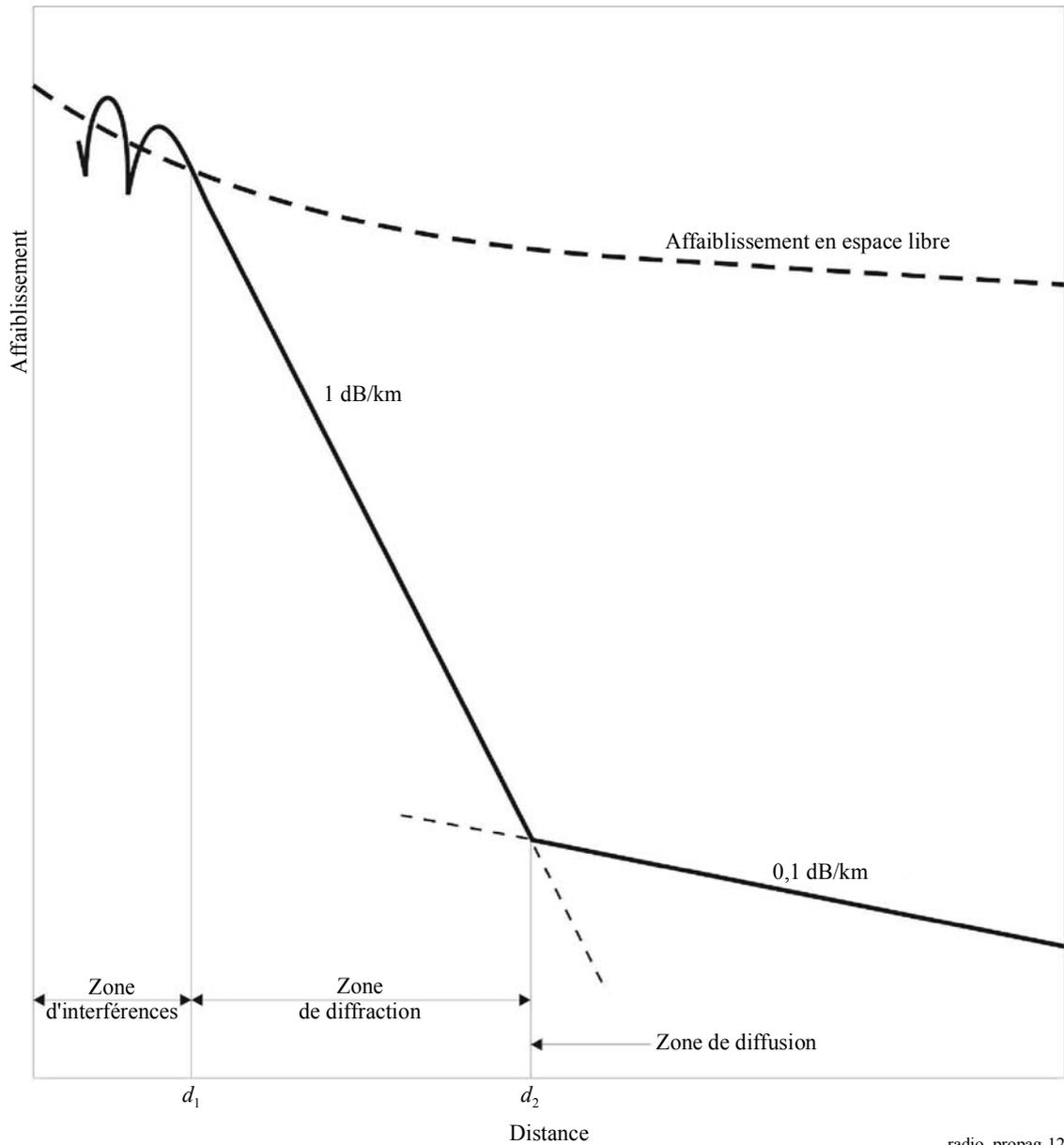
Les liaisons radioélectriques transhorizon présentent des caractéristiques bien particulières: problèmes de transmission, distorsion qui limite la largeur de bande utile et capacité d'écoulement du trafic. Du fait de ces spécificités, ces systèmes ont été exclus des réseaux modernes de téléphonie publique, sauf dans quelques pays en développement. À l'avenir, les liaisons radioélectriques transhorizon devraient être principalement utilisées dans les réseaux gouvernementaux et, dans une certaine mesure, dans les réseaux privés de communication, notamment dans l'industrie pétrolière. La plupart des nouveaux systèmes prévus étant conçus pour transmettre des données numériques, il convient d'attacher une attention particulière à la gestion des problèmes de distorsion.

3 Base théorique

Les mécanismes de propagation transhorizon se produisent sur des trajets qui s'étendent au-delà de l'horizon radioélectrique normal. Pour des fréquences supérieures à 30 MHz, les deux seuls mécanismes de propagation transhorizon permanents sont la diffraction et la diffusion troposphérique. La Fig. 12 présente l'affaiblissement lié à ces deux mécanismes en fonction de la distance.

Il convient de noter que, juste au-delà de l'horizon, le champ diffracté présente une décroissance exponentielle rapide de l'ordre de 1 dB/km à 1 GHz, alors que le champ diffusé décroît d'environ 0,1 dB/km. La Fig. 12 montre aussi la zone d'interférences (bien que celle-ci ne soit pas prise en compte dans les méthodes examinées ci-après), où l'oscillation du champ reçu est due à la somme des phases du rayon direct et du rayon réfléchi.

FIGURE 12
Zones d'interférences, de diffraction et de diffusion



radio_propag-12

3.1 Diffraction

Comme indiqué au § 3.3 de la Partie 1, si l'atmosphère est caractérisée par une sous-réfraction suffisante, les ondes radioélectriques se courbent vers la Terre. Deux effets principaux sont liés à ce mécanisme: la diffraction sur la surface courbée de la Terre et la diffraction sur les irrégularités du relief.

3.1.1 Diffraction sur une Terre sphérique lisse

La série des résidus fournit une solution classique de la diffraction sur une Terre sphérique (lisse et homogène) [Bremmer, 1949]. Au-dessus ou au-delà de l'horizon, le premier terme de cette série fournit une valeur approchée valide de l'évaluation du champ diffracté [Bullington, 1947 et Rice *et al.*, 1967]. Si cette solution est satisfaisante pour de nombreuses applications, il est parfois nécessaire de fournir une valeur plus précise, notamment pour prévoir l'intensité du champ de propagation pour un trajet situé en partie au-dessus des terres et au-dessus de la mer.

S'agissant du problème de diffraction au-dessus d'une Terre non homogène, une solution semi-empirique été donnée par Millington [1949a] et une solution a également été obtenue par résolution d'équation intégrale en appliquant le théorème de compensation [Monteath, 1951]. En outre, Wait [1974] présente des résultats numériques pour une Terre lisse composée de deux ou trois parties. À noter enfin un point important: les prévisions de l'effet renforcement qui se produit au niveau du littoral [Millington, 1949b et Millington et Isted, 1950] ont été confirmées par des données expérimentales.

3.1.2 Diffraction par des obstacles isolés

On peut considérer qu'un trajet de propagation dont les deux extrémités ont un horizon commun correspond à un modèle à arête unique en lame de couteau. Pour résoudre ce problème, l'approche classique repose sur la théorie scalaire de Fresnel-Kirchhoff relative aux ondes optiques [Born et Wolf, 1970]. Cela étant, on a vérifié que, dans certains cas, l'effet de la dimension de l'obstacle conduit à des résultats assez éloignés de ceux prévus par le modèle à arête en lame de couteau. Dans les années 50, Fock a apporté une correction à cette solution, qui montre que le champ diffracté se compose de deux parties. L'une est obtenue par la théorie de Fresnel-Kirchhoff et l'autre, qui est fonction de la dimension de l'obstacle, correspond au facteur de correction approprié. Il convient en outre de mentionner que, conformément au principe de l'action locale [Fock, 1965], la diffraction sur un obstacle arrondi est indépendante de la forme de l'obstacle.

En se basant sur les travaux de Fock, Wait et Conda ont étudié la diffraction provoquée par un obstacle lisse et cylindrique pour des angles rasants [Wait et Conda, 1959]. En résolvant une équation intégrale par des méthodes numériques, ils sont parvenus à éviter le problème de faible convergence de la série dans la région à visibilité directe, problème caractéristique des autres solutions existantes. Des extensions des résultats de Wait et Conda ont été publiées dans les années 60 [Dougherty et Maloney, 1964 et Dougherty et Wilkerson, 1967], notamment des formules et des graphiques techniques à visée pratique.

3.1.3 Diffraction par des obstacles multiples

On dispose depuis un certain nombre d'années de solutions rigoureuses au problème à deux obstacles de type arête en lame de couteau [Millington *et al.*, 1962 et Furutsu, 1963]. La résolution théorique du problème jusqu'à dix obstacles de ce type nécessite l'évaluation numérique d'une intégrale multiple de type Fresnel, dont la dimension correspond au nombre d'arêtes [Vogler, 1982]. Des méthodes approchées, reposant toutes sur la théorie de la diffraction par une arête unique, ont été proposées à des fins d'ingénierie [Epstein et Peterson, 1953; Deygout, 1966 et Giovaneli, 1984].

Il n'existe pas de méthode rigoureuse pour prévoir l'intensité du champ résultant de la diffraction sur plusieurs obstacles arrondis. Une extension de la méthode de Deygout [Assis, 1971] utilise une solution simplifiée fondée sur l'hypothèse selon laquelle chaque obstacle peut être représenté par un cylindre dont le rayon est égal au rayon de courbure au sommet de l'obstacle. Par ailleurs, Sharples et Mehler ont proposé une solution basée sur la procédure de Vogler [1982] pour une série de cylindres en cascade [Sharples et Mehler, 1989]. Leur solution, qui se limite au premier terme de la série infinie de Vogler, produit un résultat analogue à celui obtenu par Epstein et Peterson [1953], mais qui intègre un facteur de correction pour tenir compte des affaiblissements d'étalement.

La Recommandation UIT-R P.526 présente deux méthodes de prévision de la diffraction par plusieurs obstacles. Dans la première, on suppose que chaque obstacle peut être représenté par un cylindre de rayon égal au rayon de courbure au sommet de l'obstacle. Cette méthode est recommandée lorsqu'on dispose d'un profil vertical détaillé de la liaison émetteur/récepteur. La seconde, qui repose sur l'hypothèse d'obstacles à arête en lame de couteau, utilise la construction de Deygout limitée à trois arêtes au maximum ainsi qu'une correction empirique obtenue à partir de mesures effectuées sur 25 000 trajets au Royaume-Uni.

3.1.4 Diffraction par un terrain irrégulier

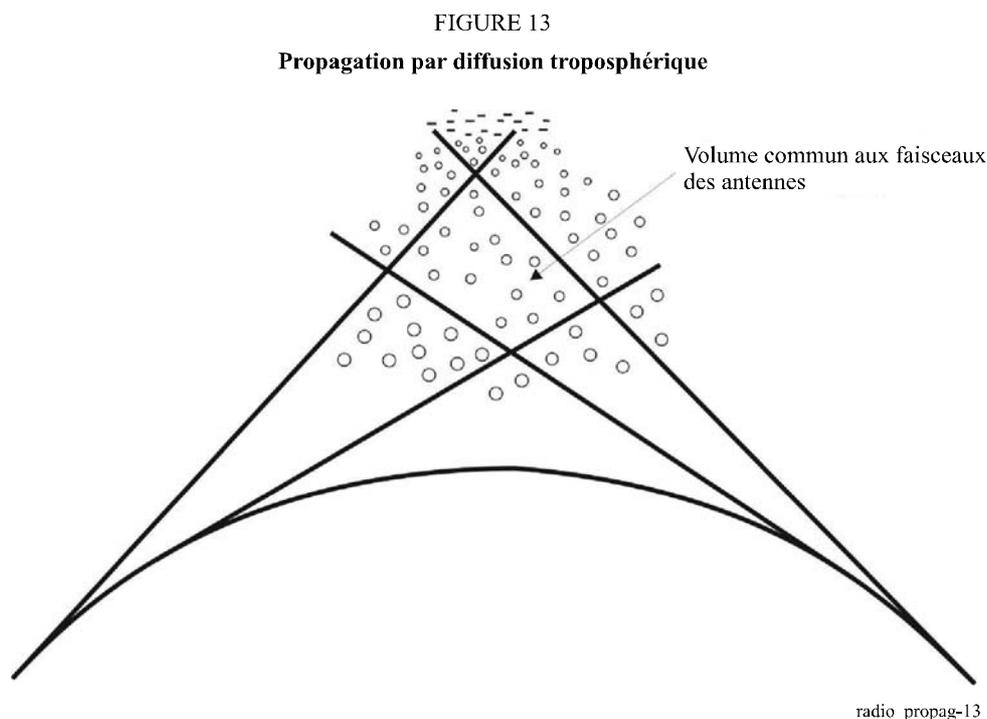
Hufford a développé une approche théorique fondamentale du problème de diffraction par des irrégularités du relief [Hufford, 1952] en utilisant une technique d'équation intégrale. Ott et Berry [1970] et Ott [1971] ont poursuivi les recherches dans cette direction. Dans leur modèle, le terrain peut être représenté par un profil totalement arbitraire le long du grand cercle et les propriétés électriques de la Terre peuvent varier de façon continue. Malheureusement, pour prendre en compte une définition fine de la structure du terrain, il faut disposer d'un espace de stockage numérique considérable.

Furutsu et Wilkerson ont proposé une méthode semi-empirique permettant d'estimer le gain dû à une crête sur une Terre sphérique et homogène [Furutsu et Wilkerson, 1970 et 1971]. Cette méthode utilise un graphique représentant le «gain terminal» d'obstacle, défini comme la valeur asymptotique du gain théorique d'obstacle pour une distance de propagation infinie sur l'un des côtés de l'obstacle, en prenant l'hypothèse d'une distance finie sur l'autre côté. Une approche d'adaptation de mode a donné des résultats analogues [Wait, 1974].

À noter le développement d'une méthode numérique [Assis, 1982], applicable lorsqu'une caractéristique du terrain peut être modélisée par une arête unique en lame de couteau et que le terrain est irrégulier dans une direction perpendiculaire au plan de propagation (grand cercle). Des mesures effectuées dans la gamme de fréquences 270-330 MHz indiquent que les calculs relatifs à l'arête en lame de couteau peuvent entraîner des erreurs de ± 10 dB si les irrégularités latérales ne sont pas prises en compte.

3.2 Diffusion troposphérique

Dans le mécanisme de diffusion troposphérique, l'énergie est diffusée par les inhomogénéités de la troposphère dans le volume commun, à savoir le volume constitué de la partie de la troposphère visible à la fois de l'antenne d'émission et de l'antenne de réception, comme indiqué à la Fig. 13.



Après la découverte de ce mécanisme dans les années 50, de nombreuses études théoriques, objets de maints débats scientifiques, ont été menées pendant une quinzaine d'années, sans qu'aucune théorie ne prenne jamais le pas sur les autres. Cela étant, les principaux mécanismes en jeu sont, de l'avis général, la diffusion turbulente et la réflexion incohérente sur les couches [Friis *et al.*, 1957], les sous-mécanismes des deux phénomènes pouvant être dominants, en fonction des caractéristiques climatologiques de la région géographique considérée. Des modèles mathématiques visant à évaluer l'affaiblissement dû à la diffusion troposphérique à partir de paramètres tels que l'échelle de turbulence et la taille des couches ont été développés. Étant donné qu'il est difficile de déterminer ces paramètres à partir de mesures météorologiques, ces modèles ne sont toutefois pas utilisés dans les applications pratiques. Quoi qu'il en soit, ils sont intéressants à plus d'un titre: analyse de la dépendance en fréquence et en distance, étude du phénomène d'affaiblissement de gain d'antenne, etc. [Du Castel, 1966]. Des mesures de propagation ont d'ailleurs été

utilisées dans cette optique pour proposer des modèles empiriques ou semi-empiriques destinés à évaluer l'affaiblissement de transmission.

À l'heure actuelle, la prédiction des trajets de diffusion troposphérique repose sur ces méthodes empiriques ou semi-empiriques. Deux méthodes, publiées en 1965, sont utilisées comme méthodes de référence dans les études de l'UIT-R depuis plus de vingt ans. L'une d'elles, publiée pour la première fois en mai 1965 puis deux ans plus tard sous une forme révisée [Rice *et al.*, 1967], est une version simplifiée de la méthode du National Bureau of Standards (NBS) des États-Unis. Selon cette méthode, l'affaiblissement de transmission annuel moyen (valeurs médianes) est donné par la formule:

$$L(50) = 20 \log f - 20 \log d + F(\theta) + L_c - G_t - G_r - V(d_e) \quad (130)$$

où d désigne la distance (km), f la fréquence (MHz), θ (rad) l'angle entre les rayons passant par l'horizon radioélectrique dans le plan du grand cercle contenant les antennes dans des conditions atmosphériques moyennes (voir Fig. 14), et G_t et G_r les gains de l'antenne d'émission et de réception (dB). Les fonctions $F(\theta)$ et $V(d_e)$ ainsi que la définition de la distance équivalente d_e sont données dans [Rice *et al.*, 1967]. L_c désigne la perte de couplage entre l'antenne et le milieu (voir la Recommandation UIT-R P.617).

L'angle de diffusion θ est donné par:

$$\theta = \theta_e + \theta_t + \theta_r \quad (131)$$

où θ_t et θ_r sont les angles de site de l'horizon à l'émetteur et au récepteur respectivement. On peut calculer ces angles par les formules suivantes:

$$\theta_e = d \times 10^3 / ka \quad \text{mrad} \quad (132)$$

$$\theta_{t,r} = \frac{h'_{1,2} - h_{1,2}}{d_1} - \frac{d_{1,2} \times 10^3}{ka} \quad \text{mrad} \quad (133)$$

où:

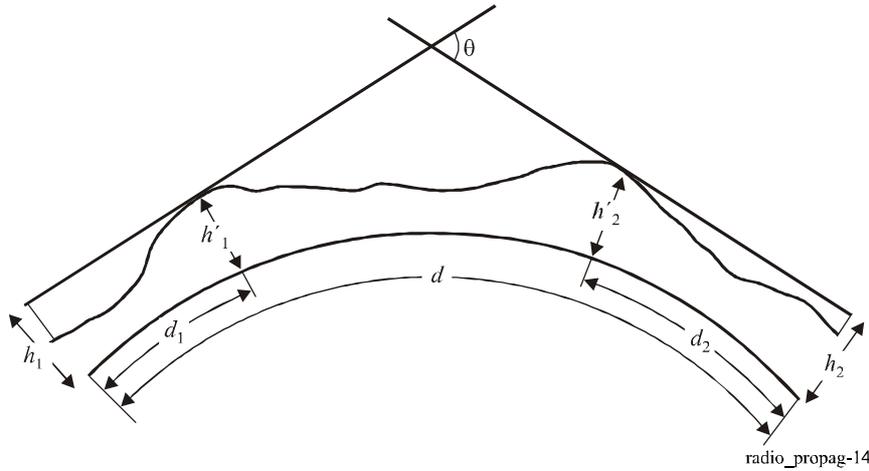
d : longueur du trajet (km)

a : 6370 km, rayon de la Terre

k : facteur de rayon équivalent de la Terre pour des conditions de réfraction médianes (on prendra $k = 4/3$ sauf si on connaît une valeur plus précise).

Les hauteurs des antennes ($h_{1,2}$ et $h'_{1,2}$) (m) et les distances ($d_{1,2}$) (km) sont présentées à la Fig. 14.

FIGURE 14
Configuration géométrique de la diffusion



Pour d'autres pourcentages du temps sur l'année, Rice *et al.* [1967] fournissent un ensemble de courbes en fonction de la distance équivalente et du climat. Pour tenir compte de la variabilité géographique du climat dans le monde, cette méthode définit neuf climats radioélectriques: équatorial; intertropical continental; intertropical maritime; désertique; méditerranéen; continental tempéré; maritime tempéré, zones terrestres; maritime tempéré, zones maritimes; polaire. De toute évidence, ce découpage assez grossier peut nécessiter des modifications importantes selon les conditions géographiques locales. On trouvera une brève description de ces neuf climats dans la Recommandation UIT-R P.617.

La seconde méthode, entièrement graphique, repose sur des mesures effectuées en Europe et en Afrique. Un ensemble de courbes a été tracé pour les climats suivants: équatorial; intertropical maritime; désertique; continental tempéré; maritime tempéré, zones terrestres. Ces courbes montrent l'affaiblissement de transmission entre des antennes isotropes à 1 GHz pour plusieurs pourcentages du temps (1%, 10%, 50%, 90%, 99% et 99,9%), pour le mois le plus défavorable et pour l'année complète. Elles peuvent servir à concevoir des faisceaux hertziens [Boithias et Battesti, 1965]. Le facteur de correction (dB) applicable aux fréquences autres que 1 GHz est $30 \log(f/1000)$, f étant exprimée en MHz.

Dans cette méthode, les courbes ont été tracées en supposant que chaque extrémité de la liaison voit l'horizon avec un angle d'élévation nul. Si les angles d'élévation sont respectivement θ_1 et θ_2 , en radians, la distance réelle doit être remplacée par une distance équivalente d_q (km) selon la formule:

$$d_q = d + 8,5(\theta_1 + \theta_2) \quad (134)$$

De plus, le terme suivant doit être ajouté à l'affaiblissement ainsi calculé:

$$20 \log(d/d_q) \quad (135)$$

Plus récemment, une méthode simple de précision acceptable a été développée en République populaire de Chine [Zhang, 1988]. Sa forme initiale est tirée de [Zhang, 1977], la partie relative à la diffusion étant exprimée sous la forme:

$$\sigma = A\lambda^n \theta m e^{-\gamma h} \quad (136)$$

où λ désigne la longueur d'onde, θ l'angle de diffusion, h la hauteur comprise entre la base du volume de diffusion et la surface de la Terre, et A , n , m , et γ des paramètres météorologiques. Le facteur en λ et θ caractérise le mécanisme de diffusion, à savoir une diffusion turbulente lorsque $n = m - 4$ et une réflexion incohérente sur les couches lorsque n et m prennent d'autres valeurs. Le facteur exponentiel traduit la dépendance de l'intensité d'inhomogénéité avec la hauteur. La forme théorique initiale de l'affaiblissement de transmission a été modifiée en ajustant les paramètres météorologiques, une première fois à l'aide de données de propagation chinoises et une seconde fois en utilisant la banque de données de la Commission d'études 3 des radiocommunications. Cette procédure a mené à une équation très simple des valeurs médianes de

l'affaiblissement de transmission annuel moyen. De plus, on pense que la différence entre l'affaiblissement de transmission non dépassé pendant 50% du temps et l'affaiblissement de transmission non dépassé pendant 90% du temps – caractéristique de la variation annuelle – a la forme suivante:

$$Y(90) = a' + b' e^{-c'h} \quad (137)$$

où a' , b' , et c' désignent des constantes à déterminer et h la hauteur comprise entre la base du volume de diffusion et la surface de la Terre. Les constantes a' et c' sont des fonctions du climat alors que la constante b' dépend de l'intervalle de variation annuelle ΔN_S (coïndice de réfraction à la surface), de la fréquence et du climat.

4 Prévion de l'affaiblissement de transmission

Les informations fournies dans la présente section reposent principalement sur les Recommandations UIT-R P.526, en particulier les versions UIT-R P.526-3 et UIT-R P.526-9, pour ce qui concerne la diffraction, et sur la Recommandation UIT-R P.617 pour ce qui a trait à la diffusion. Étant donné que ces Recommandations ne couvrent qu'un nombre limité de cas pratiques, le lecteur est invité à se reporter aux références citées dans la section précédente. Il trouvera en outre, dans la Recommandation UIT-R P.341, des informations détaillées sur le concept d'affaiblissement de transmission utilisé ici.

Analyse du profil du trajet

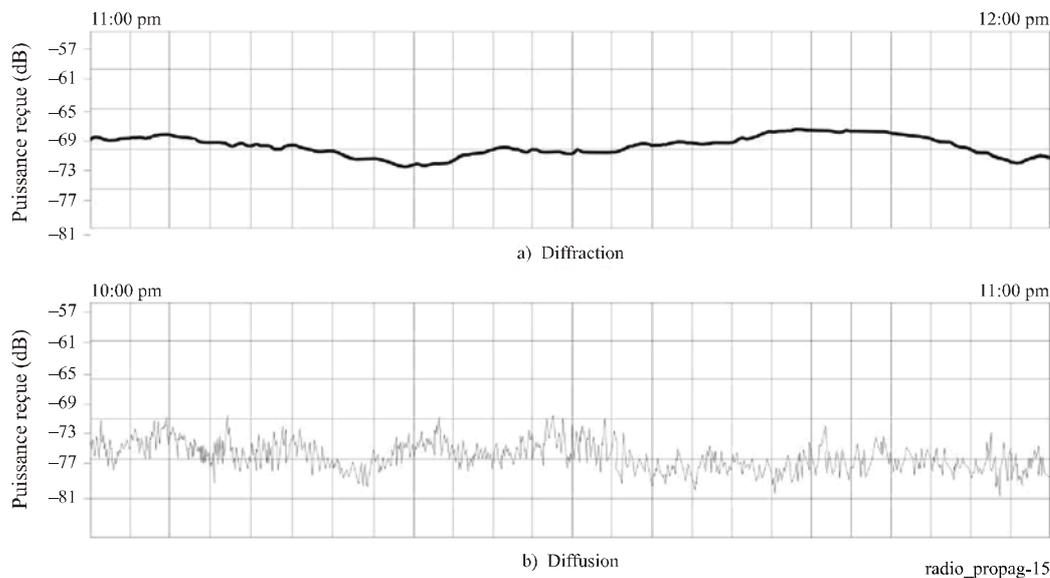
La première étape de cette analyse consiste à reporter le profil du trajet sur un graphique à échelle linéaire en modifiant les élévations du terrain de façon à intégrer l'effet de la réfraction troposphérique. En l'absence d'informations concernant le rayon terrestre équivalent à utiliser, on pourra prendre comme référence la valeur standard de 8 500 km.

Une fois le profil du trajet convenablement tracé, on vérifiera quel mécanisme principal de propagation est en jeu (diffraction ou diffusion). Comme le montre la Fig. 12, il peut y avoir diffraction même dans le cas d'un trajet à visibilité directe. La limite entre la région des interférences et la région de diffraction (d_1 dans la Fig. 12) correspond au point où le dégagement du trajet normalisé par rapport au rayon de la première zone de Fresnel est égal à 0,6 (voir la Recommandation UIT-R P.530).

La limite entre la région de diffraction et la région de diffusion (d_2 dans la Fig. 12) n'est pas facile à déterminer. En fait, d'après des données expérimentales, il existe une région intermédiaire dans laquelle il convient de prendre en compte les deux phénomènes: diffusion et diffraction. Cette région se situe, en règle générale, à 100-150 km du site de l'antenne d'émission. Dans ce cas, il est conseillé d'évaluer les affaiblissements dus aux deux mécanismes et d'utiliser celui qui est le plus adapté à l'application considérée (un affaiblissement plus élevé pour la planification et un affaiblissement plus faible pour les calculs de brouillage). Pour illustrer ce cas, la Fig. 15 [Assis, 1986] présente deux échantillons de la variation de puissance reçue, pour une liaison de 135 km à 300 MHz, dans la région Amazonie (climat équatorial).

Pendant la journée, le mécanisme de propagation par diffusion troposphérique prédomine et la puissance reçue varie rapidement dans un intervalle de 10 dB environ. Pendant la nuit, le signal se comporte assez différemment: sous l'effet de la stratification de la troposphère, la puissance reçue varie lentement et ne présente pas les fluctuations rapides observées en journée.

FIGURE 15

Exemple d'enregistrements de puissance reçue pour une liaison décimétrique située dans la région équatoriale**4.1 Affaiblissement par diffraction**

La propagation au-dessus de la surface de la Terre présentant souvent des trajets avec diffraction, il est nécessaire d'estimer l'affaiblissement de transmission dû à la diffraction soit au-dessus d'une surface terrestre sphérique, soit au-dessus d'un relief irrégulier, et ce en incluant différents types d'obstacles. Dans les deux cas, on prendra pour référence de l'affaiblissement par diffraction l'affaiblissement par rapport à la propagation en espace libre.

4.1.1 Diffraction au-dessus d'une Terre sphérique

Pour évaluer l'affaiblissement par diffraction des trajets au-delà de l'horizon, la Recommandation UIT-R P.526 présente une méthode numérique et une méthode graphique, les deux tirées de la même approximation, à savoir la prédominance du premier terme de la série des résidus. La méthode numérique repose essentiellement sur une contribution de l'Administration des États-Unis d'Amérique et la méthode graphique est issue de travaux présentés par l'Administration française. Dans les deux méthodes, l'approximation susmentionnée permet d'évaluer les contributions de la distance et de la hauteur des antennes séparément.

Il convient de noter que, dans la bande métrique et au-delà, en polarisation horizontale sur tout type de sol ou en polarisation verticale au-dessus des terres, l'effet des caractéristiques électriques de la surface de la Terre peut être négligé. En revanche, en polarisation verticale au-dessus de la mer à des fréquences allant jusqu'à 300 MHz, cet effet doit être pris en compte. Pour ce faire, la méthode numérique décrite dans la Recommandation UIT-R P.526 intègre un paramètre β [Boithias, 1983], fonction de la permittivité relative équivalente ϵ et de la conductivité relative σ de la Terre. Il en va de même pour la solution graphique, avec un couple de nomogrammes différent à utiliser dans chaque cas.

Dans le cas des trajets à visibilité directe avec diffraction sur les sous-trajets, il est recommandé d'utiliser une interpolation linéaire entre, d'une part, la limite de la zone de diffraction (dégagement égal à 0,6 du rayon de la première zone de Fresnel) où l'affaiblissement par rapport à l'espace libre est égal à zéro et, d'autre part, l'horizon radioélectrique.

4.1.2 Diffraction par une arête en lame de couteau

Ce modèle, fortement idéalisé, n'a d'intérêt que dans les cas où le rayon de courbure de l'obstacle est négligeable, par exemple lorsque les deux extrémités ont, sur le trajet considéré, un horizon commun. La Recommandation UIT-R P.526 propose une équation approchée [Boithias, 1983] pour évaluer

l'affaiblissement de propagation par rapport à l'espace libre dû à une arête en lame de couteau. Cette équation est valable dans la région de diffraction.

4.1.3 Obstacle unique de sommet arrondi

La solution adoptée par la Recommandation UIT-R P.526 repose sur les travaux de Dougherty et Maloney [1964] et de Dougherty et Wilkerson [1967]. Selon ces auteurs, l'affaiblissement par diffraction est donné par:

$$A = J(\nu) + T(m, n) \quad (138)$$

où $J(\nu)$ désigne l'affaiblissement de Fresnel-Kirchoff, qui suppose un unique obstacle pointu (arête en lame de couteau), et $T(m, n)$ une fonction de correction pour prendre en compte les dimensions de l'obstacle (m et n). Le paramètre ν est défini par:

$$\nu = [2]^{1/2} h/F_1 \quad (139)$$

où h désigne l'obstruction du trajet mesurée à partir de la ligne joignant les antennes d'émission et de réception, et F_1 le rayon de la première zone de Fresnel, évalué à l'endroit où se trouve l'obstacle. Selon la notation d'origine utilisée par les auteurs, la fonction $T(m, n)$ est donnée par:

$$T(m, n) = T(\rho) + Q(X) \quad (140)$$

où:

$$T(\rho) = 7,2 \rho - 2 \rho^2 + 3,6 \rho^3 - 0,8 \rho^4 \quad (141)$$

et

$$Q(X) = \begin{cases} 12,5 X & \text{para } 0 < X < 4 \\ 17 X - 6 - 20 \log X & \text{para } X \geq 4 \end{cases} \quad (142)$$

avec $m = \rho^2$; $mn = X$; $\rho = (\lambda^2 R)^{1/3} / \pi^{1/6} F_1$; $X = (\pi R)^{1/3} \lambda^{2/3} h / F_1^2$ et R le rayon de courbure de l'obstacle.

Difficulté majeure pour appliquer cette solution: la détermination du rayon de courbure de l'obstacle. Une solution pratique offrant une précision acceptable [Crysdale, 1958; Assis, 1971] consiste à utiliser le rayon de courbure du sommet d'une parabole ajustée au profil de l'obstacle, à proximité du sommet. Cette procédure est facile à mettre en œuvre si l'on dispose de cartes numériques sur la topographie du relief.

4.1.4 Cas à deux arêtes en lame de couteau

Des deux méthodes proposées dans la Recommandation UIT-R P.526, celle d'Epstein et Peterson [1953] est la plus simple. Une correction inspirée de [Millington *et al.*, 1962] est cependant proposée pour prendre en compte l'écart entre les arêtes. Si l'une des arêtes prédomine, il est recommandé d'employer la méthode de Deygout [Deygout, 1966], auquel cas la correction n'est pas nécessaire.

4.1.5 Plusieurs obstacles isolés

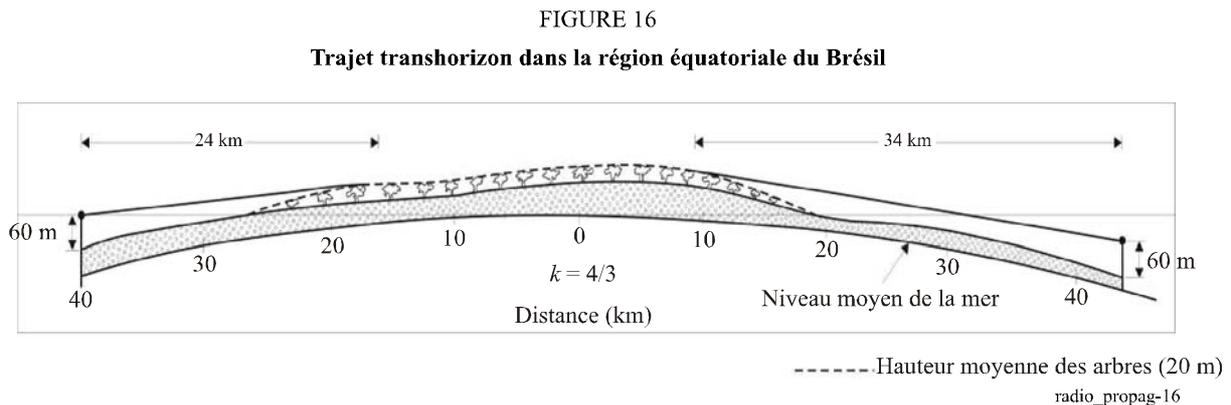
Comme indiqué précédemment, la Recommandation UIT-R P.526 indique deux méthodes pour traiter ce cas de figure. La première repose sur une organisation de cylindres en cascade, la seconde sur l'hypothèse d'obstacles de type arête en lame de couteau. La méthode des cylindres en cascade a une base mathématique solide, étayée par des résultats expérimentaux en assez grand nombre [Sharples et Mehler, 1989 et Eliades, 1993]. La méthode des arêtes en lame de couteau repose sur une approche proposée par Deygout [1966], limitée à trois arêtes plus une correction empirique. On peut montrer que le modèle de Deygout est compatible avec la théorie géométrique de la diffraction [Pogozelski, 1980]. Cela étant, la dimension de l'obstacle n'étant pas prise en compte, la correction empirique n'a pas de signification physique.

Il faut bien reconnaître que le modèle des arêtes en lame de couteau est plus facile à transcrire en code informatique et qu'il peut servir de première approche à des fins de planification. Cela étant, lorsque la précision est d'une importance capitale, il convient de donner la préférence à la méthode des cylindres en cascade.

4.1.6 Exemples d'application

4.1.6.1 Trajet au-dessus d'une Terre sphérique

La Fig. 16 présente le profil d'un trajet de 84 km à 328 MHz dans la région Amazonie, entre les villes de Castanhal et Capanema dans l'État de Pará, Brésil.



Ce trajet a été tracé avec un rayon terrestre équivalent de 8 500 km. Sa plus grande partie est couverte de forêts denses, la hauteur médiane des arbres étant de 20 m environ. Bien qu'il ne s'agisse pas exactement d'un trajet au-dessus d'une terre sphérique lisse, la procédure décrite au § 4.2.1 a été utilisée pour le calcul de l'affaiblissement par diffraction. Cependant, pour garantir l'intégrité du problème physique, la distance entre les horizons (26 km) et la distance de chaque extrémité à son horizon (24 km et 34 km) ont été conservées.

Sous ces hypothèses, on a déterminé le trajet équivalent suivant:

- longueur du trajet: 84 km;
- hauteur équivalente de l'antenne à l'extrémité A: $h_A = 34$ m;
- hauteur équivalente de l'antenne à l'extrémité B: $h_B = 68$ m.

Avec ces données, l'évaluation de l'affaiblissement par diffraction est relativement simple:

- affaiblissement sur la distance: $-36,2$ dB ($36,0$ dB avec le nomogramme);
- gain dû à la hauteur à l'extrémité A: $-1,9$ dB ($-1,5$ dB avec le nomogramme);
- gain dû à la hauteur à l'extrémité B: $5,4$ dB ($5,0$ dB avec le nomogramme).

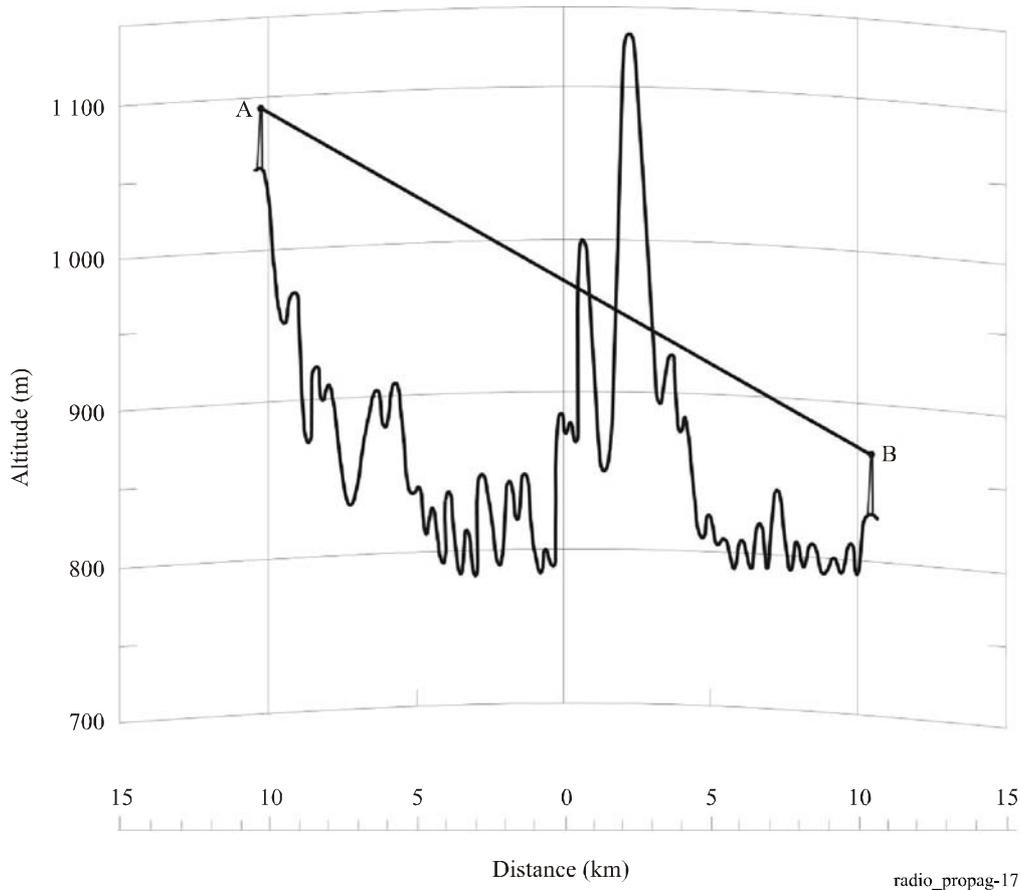
L'affaiblissement par diffraction par rapport à la propagation en espace libre était donc de $32,7$ dB (ou $36,5$ dB avec les nomogrammes). Ces valeurs concordent avec les mesures ($34,8$ dB).

4.1.6.2 Diffraction au-dessus d'un obstacle unique

La Fig. 17 présente le profil d'un trajet de 20,5 km à 300 MHz entre les villes de Bragança Paulista et Piracaia dans l'État de São Paulo, Brésil. Le trajet a été tracé avec un rayon terrestre équivalent de 8 500 km.

FIGURE 17

Diffraction au-dessus d'un unique obstacle de sommet arrondi



Les paramètres élémentaires tirés de la figure ci-dessus sont:

$$d_1 = 12,5 \text{ km}; \quad d_2 = 8,0 \text{ km}; \quad h_a = 1086 \text{ m}; \quad h_b = 865; \quad h_n = 1135 \text{ m}; \quad R = 1500 \text{ m}$$

Lorsque $\lambda = 1 \text{ m}$, selon la Recommandation UIT-R P.526, le paramètre ν est donné par:

$$h = h_n + d_1 d_2 / (2ka) - (h_a d_2 + h_b d_1) / d = 190 \text{ m} \quad (143)$$

$$\nu = h \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)} = 3,8 \quad (144)$$

où R , d_1 , d_2 , h et λ sont exprimés en unités cohérentes.

a) *Affaiblissement de Fresnel-Kirchoff*

D'après la Recommandation UIT-R P.526:

$$J(\nu) = 6,9 + 20 \log \left(\sqrt{(\nu - 0,1)^2 + 1} + \nu - 0,1 \right) = 24,4 \quad \text{dB} \quad (145)$$

b) *Affaiblissement supplémentaire dû à la courbure de l'obstacle*

En appliquant la Recommandation UIT-R P.526, on obtient:

$$m = R \left[\frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2} \right] \Big/ \left[\frac{\pi R}{\lambda} \right]^{1/3} = 0,018 \tag{146}$$

$$n = h \left[\frac{\pi R}{\lambda} \right]^{2/3} \Big/ R = 35,5 \tag{147}$$

où R , d_1 , d_2 , h et λ sont exprimés en unités cohérentes.

$$T(m,n) = 7,2 m^{1/2} - (2 - 12,5 n)m + 3,6 m^{3/2} - 0,8 m^2 = 9,1 \text{ dB} \tag{148}$$

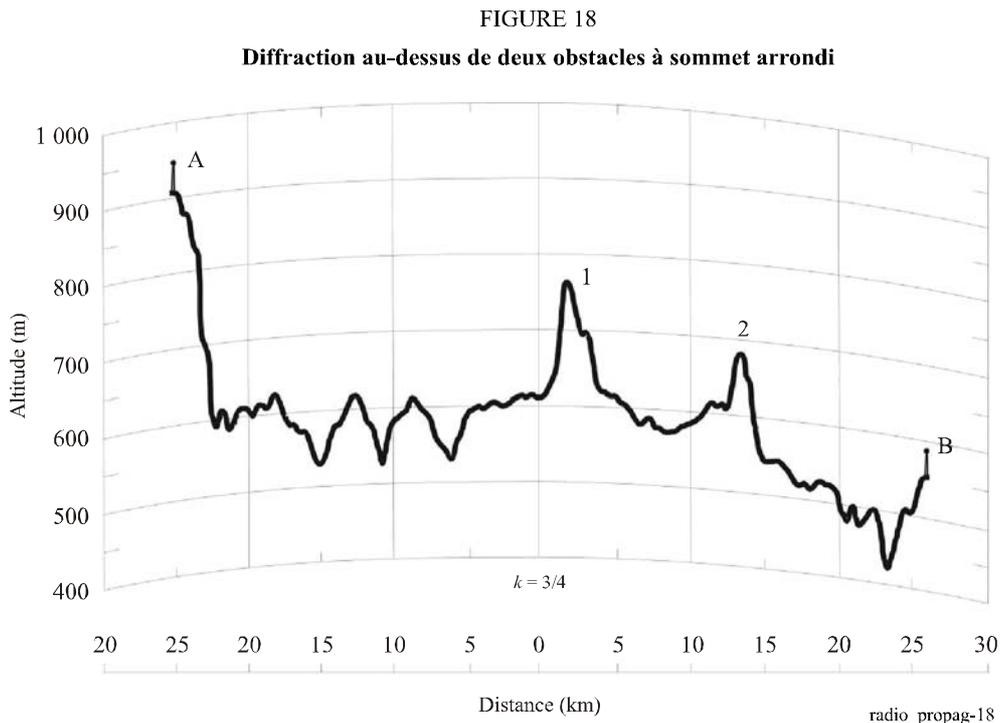
c) *Affaiblissement de diffraction total*

$$A = J(v) + T(m,n) = 33,5 \text{ dB} \tag{149}$$

La valeur mesurée de l'affaiblissement par diffraction par rapport à la propagation en espace libre était de 34,9 dB.

4.1.6.3 Diffraction par des obstacles multiples

La Fig. 18 présente le profil d'un trajet par diffraction de 50,6 km à 312,27 MHz ($\lambda = 0,94 \text{ m}$) entre deux stations hertziennes à proximité de la ville de Caçu dans l'État de Goiás, Brésil.



Le trajet a été tracé avec un rayon terrestre équivalent de 8 500 km. Les paramètres élémentaires tirés de la figure ci-dessus sont:

$$a = 26,6 \text{ km}; \quad b = 11,8 \text{ km}; \quad c = 12,2 \text{ km}; \quad h_a = 943 \text{ m}; \quad h_b = 591 \text{ m}; \quad h_{n1} = 762 \text{ m}; \quad h_{n2} = 684 \text{ m}.$$

Les rayons de courbure des obstacles 1 et 2 sont respectivement de 1 500 m et 1 000 m.

Dans le cas de la méthode des cylindres en cascade, l'affaiblissement total par diffraction en dB par rapport à la propagation en espace libre est donné dans la Recommandation UIT-R P.526:

$$L_d = L'_1 + L'_2 - 20 \log C_2 \quad (150)$$

où:

L'_1 : affaiblissement par diffraction au-dessus du premier cylindre calculé par la méthode présentée dans la Recommandation UIT-R P.526

L'_2 : idem pour le second cylindre

C_2 : facteur de correction pour tenir compte de l'affaiblissement d'étalement dû à la diffraction sur les cylindres successifs.

Le facteur de correction, C_2 , est calculé à l'aide de:

$$C_2 = (P_a / P_b)^{0,5} \quad (151)$$

$$P_a = abc(a + b + c) \quad (152)$$

$$P_b = ac(a + b)(b + c) \quad (153)$$

Les paramètres $h'_{1,2}$ et $v'_{1,2}$ pour les obstacles 1 et 2, calculés selon la procédure de l'exemple précédent, sont $h'_1 = 17 \text{ m}$, $v'_1 = 0,27$, $h'_2 = 14,5 \text{ m}$, $v'_2 = 0,27$.

On a donc:

$$J(v_1) = J(v_2) = 8,4 \quad \text{dB} \quad (154)$$

Les paramètres m_1 , n_1 et m_2 , n_2 sont calculés selon la procédure de l'exemple précédent, ce qui donne $m_1 = 0,011$, $n_1 = 3,32$, $m_2 = 0,011$ et $n_2 = 3,24$.

Les affaiblissements supplémentaires dus à la courbure des obstacles sont:

$$T_1(m_1, n_1) = T_2(m_2, n_2) \cong 1,2 \quad \text{dB} \quad (155)$$

Le terme correctif permettant de prendre en compte la distance entre les obstacles est donné par:

$$C_2(\text{dB}) = 10 \log (P_a + P_b) = -1,9 \quad \text{dB} \quad (156)$$

et le supplément d'affaiblissement supplémentaire devient:

$$L = J(v_1) + T_1(m_1, n_1) + J(v_2) + T_2(m_2, n_2) - C_2 = 21,1 \quad \text{dB} \quad (157)$$

Le supplément d'affaiblissement mesuré sur la liaison était de 23 dB.

On peut aussi utiliser la méthode des arêtes en lame de couteau en cascade. La première étape de l'application de la construction de Deygout consiste à déterminer l'arête principale, c'est-à-dire la crête présentant la valeur de v la plus élevée.

Pour l'obstacle 1, $d_1 = d_a = 26,6$ km; $d_2 = (d_b + d_c) = 24$ km; $h_n = 762$ m; $R = 1\,500$ m, ce qui donne:

$$h_1 = h_n + d_1 d_2 / (2ka) - (h_a d_2 + h_b d_1) / d = 41,6 \text{ m} \quad (158)$$

$$v_1 = h_1 \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)} = 0,54 \quad (159)$$

Pour l'obstacle 2, $d_1 = (d_a + d_b) = 28,4$ km; $d_2 = d_c = 12,2$ km; $h_n = 684$ m; $R = 1\,000$ m, ce qui donne:

$$h_2 = h_n + d_1 d_2 / (2ka) - (h_a d_2 + h_b d_1) / d = 35,7 \text{ m} \quad (160)$$

$$v_2 = h_2 \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)} = 0,54 \quad (161)$$

Étant donné que la valeur de v est la même pour les deux obstacles, l'un comme l'autre peut être considéré comme l'obstacle principal. Considérons, dans cet exemple, que l'obstacle 1 est l'obstacle principal.

L'affaiblissement dû à l'obstacle principal est donné par:

$$J(v_1) = 6,9 + 20 \log \left(\sqrt{(v_1 - 0,1)^2 + 1} + v_1 - 0,1 \right) = 10,6 \text{ dB} \quad (162)$$

L'affaiblissement dû au second obstacle est une fonction des nouveaux paramètres h'_2 et v'_2 , calculés sachant que $d_1 = d_b = 11,8$ km; $d_2 = d_c = 12,2$ km; $h_a = 762$ m; $h_b = 591$ m; $h_n = 684$ m; $R = 1\,500$ m:

$$h'_2 = 14,5 \text{ m} \quad (163)$$

$$v'_2 = 0,27 \quad (164)$$

$$J(v'_2) = 6,9 + 20 \log \left(\sqrt{(v'_2 - 0,1)^2 + 1} + v'_2 - 0,1 \right) = 8,4 \text{ dB} \quad (165)$$

La correction empirique C est donnée dans la Recommandation UIT-R P.526:

$$C = 10,0 + 0,04 (d_a + d_b + d_c) = 12 \text{ dB} \quad (166)$$

Le paramètre T est donné par:

$$T = 1,0 - \exp[-J(v_1)/6,0] = 0,83 \quad (167)$$

Enfin, l'affaiblissement dû à la diffraction est donné dans la Recommandation UIT-R P.526:

$$L = J(v_1) + T [J(v_2) + C] = 27,5 \text{ dB} \quad (168)$$

4.2 Affaiblissement de transmission par diffusion troposphérique

La méthode proposée dans la Recommandation UIT-R P.617 pour estimer l'affaiblissement de transmission annuel médian $L(q)$ non dépassé pendant des pourcentages de temps supérieurs à 50% s'appuie essentiellement sur la méthode mise au point par Zhang [1988], dont le principe, reposant en partie sur des méthodes antérieures [Rice *et al.*, 1967 et Boithias et Battesti, 1965], a été décrit au § 3.2. L'expression générale de l'affaiblissement de transmission annuel non dépassé pendant $q\%$ du temps est:

$$L(q) = M + 30 \log f + 30 \log \theta + 10 \log d + 30 \log \theta + L_N + L_c - G_t - G_r - Y(q) \quad (169)$$

où, en plus des paramètres définis précédemment (f , d , L_c , θ , G_t et G_r), M désigne un facteur météorologique, L_N traduit la dépendance de l'affaiblissement de transmission par rapport à l'altitude du volume commun et $Y(q)$ correspond à la différence entre l'affaiblissement de transmission non dépassé pendant 50% du temps et l'affaiblissement de transmission non dépassé pendant $q\%$ du temps.

Pour expliciter le lien qui existe entre la procédure pas à pas décrite au § 3 de la Recommandation susmentionnée et les trois méthodes empiriques étudiées au § 3.2 du présent Manuel, il convient de noter que:

- la Recommandation UIT-R P.617 fournit des valeurs du facteur météorologique M et du paramètre de structure atmosphérique γ , déterminées à partir de données expérimentales, pour chacun des climats cités au § 3.2;
- dans la Recommandation UIT-R P.617, l'altitude du volume commun par rapport au niveau du sol est donnée sous la forme d'une expression approchée, en prenant pour hypothèse que la partie du trajet au-delà de l'horizon, pour chaque extrémité, est située au-dessus d'une Terre lisse. En pratique, on peut déterminer précisément l'altitude à partir de la géométrie du trajet;
- comme indiqué plus haut, le facteur de conversion $Y(q)$ pour $q\%$ du temps a été obtenu par régression à partir de la banque de données de la Commission d'études 3 des radiocommunications pour ce qui concerne les climats 2, 6, 7a et 7b, et à partir de trois courbes de $Y(90)$ figurant dans [Rice *et al.*, 1967] pour ce qui concerne les climats 1, 3 et 4 (en effet, en l'absence de données, il n'a pas été possible d'appliquer une technique de régression pour ces trois climats).

En outre, la distribution de l'affaiblissement de transmission moyen (valeurs médianes) pour le mois le plus défavorable, pour des pourcentages de temps supérieurs à 50%, est déterminé à partir de la distribution annuelle moyenne en appliquant un facteur de conversion tiré des courbes fournies par Boithias et Battesti [1965].

Enfin, la Recommandation UIT-R P.617 examine également la réception en diversité. Les équations fournies pour la diversité d'espace horizontale et verticale proviennent de [Fehlhaber et Grosskopf, 1967]. Dans le cas de la diversité de fréquence, l'espacement recommandé est tiré de [Fehlhaber, 1967]. La diversité angulaire est également étudiée. Un système simple mettant en œuvre ce type de diversité au niveau de la réception peut apporter une qualité de fonctionnement comparable à la diversité d'espace, pour un coût beaucoup plus faible [Surenian, 1965]. C'est pourquoi un système avec diversité angulaire est jugé comparable, en termes de qualité de fonctionnement, à un système avec diversité de fréquence, bien que l'affaiblissement de transmission soit légèrement plus élevé.

4.2.1 Gain d'antenne pour le trajet

Dans un système hertzien transhorizon, la transmission de l'énergie radioélectrique est due à la somme des rayonnements secondaires provenant de toutes les inhomogénéités atmosphériques éclairées par l'antenne d'émission. Une onde arrivant à la station de réception n'est donc pas une onde plane et le gain apparent de l'antenne de réception est par conséquent inférieur au gain en espace libre (qui est défini par une onde plane). Pour la même raison, l'ouverture du faisceau d'antenne semble plus large que dans le cas d'une onde plane. Cette diminution du gain est connue sous le nom de «perte de couplage entre l'antenne et le milieu» ou «baisse de gain».

Une analyse théorique de ce phénomène [Rice *et al.*, 1967] montre que la baisse de gain dépend du gain d'antenne et de la distance. Cela étant, contrairement à ces prévisions théoriques, l'expérience montre que la

baisse de gain est pratiquement indépendante des distances entre 150 et 500 km [Boithias et Battesti, 1964], du moins pour des climats tempérés.

On a déterminé, à partir de données expérimentales, l'équation empirique suivante [Boithias, 1983], qui permet de calculer le gain effectif total G_e sur un faisceau troposphérique en fonction de la somme des gains en espace libre des deux antennes:

$$G_e = (G_t + G_r) \exp\left(-\frac{a^4}{1+a^4}\right) \quad (170)$$

où:

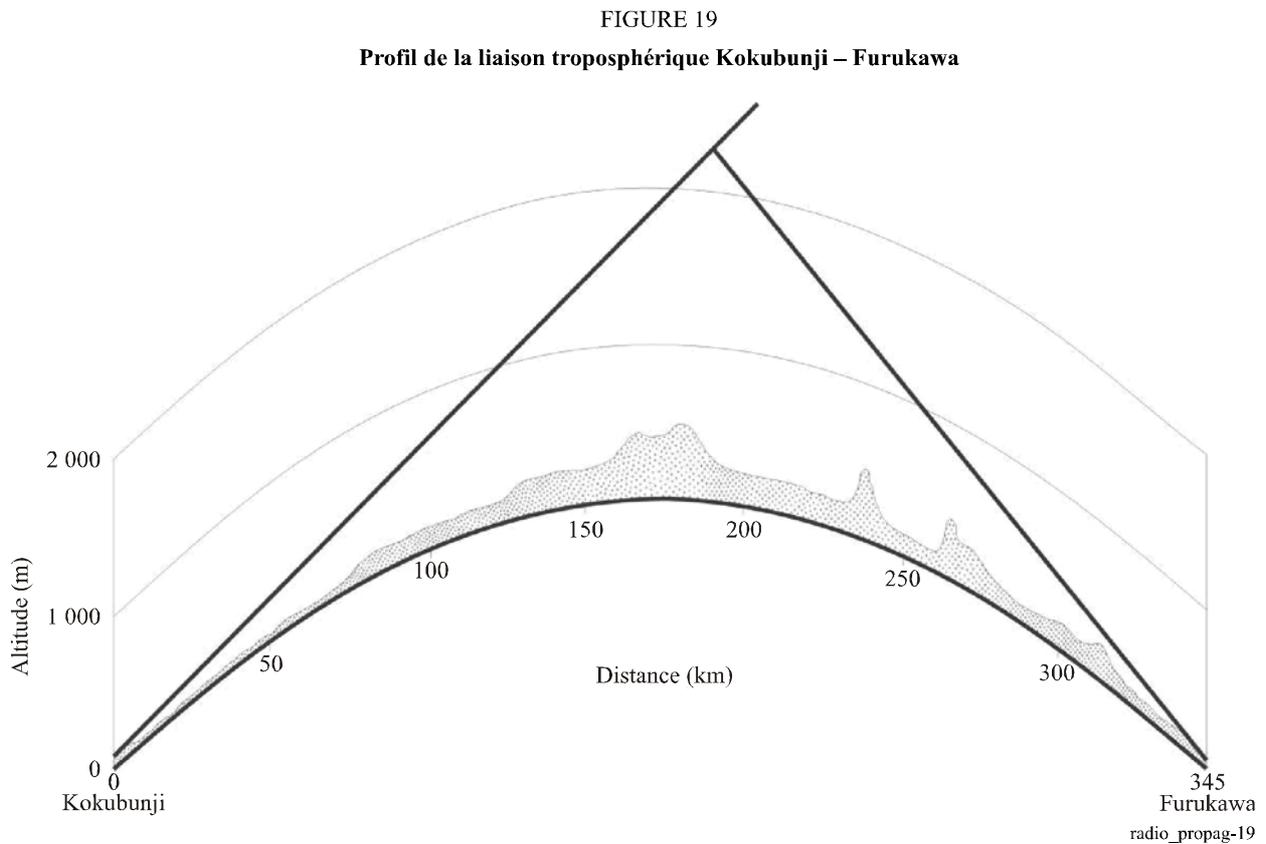
$$a = \frac{G_t + G_r}{148}$$

Cette formule est valide si $G_t + G_r < 120$ dB et si les deux antennes ont le même gain.

Une analyse numérique permet de montrer que la différence entre la formule proposée dans [Boithias, 1983] et celle fournie par l'équation (10) de la Recommandation UIT-R P.617 présente une valeur moyenne de -0,24 dB et une valeur quadratique moyenne de 0,61 dB pour G_e compris entre 50 et 100 dB.

4.2.2 Exemple d'application

La Fig. 19 présente le profil d'une liaison troposphérique entre Kokubunji et Furukawa au Japon.



Les latitudes et longitudes sont les suivantes:

Kokubunji: 35° 42' 24" N; 139° 29' 18" E

Furukawa: 38° 34' 22" N; 140° 57' 51" E

Paramètres élémentaires: $f = 600$ MHz; $d = 345$ km; $h_1 = 103$ m; $h_2 = 25$ m; $h'_1 = 104$ m; $h'_2 = 80$ m; $d_1 = 4$ km; $d_2 = 8$ km; $G_t + G_r = 56$ dB.

Pour calculer l'affaiblissement de transmission, on applique la procédure pas à pas conseillée dans la Recommandation UIT-R P.617.

Étape 1: Déterminer le climat correspondant à la liaison. Il s'agit ici d'une liaison terrestre entre les latitudes 35° N et 39° N. Le terrain environnant est accidenté. Selon les informations disponibles, l'intervalle de variation annuelle du coïndice de réfraction mensuel moyen à la surface allait jusqu'à 60 unités N environ. Selon les descriptions des climats définis dans la Recommandation UIT-R P.617, le climat approprié à la liaison considérée est donc de type 6, c'est-à-dire continental tempéré.

Étape 2: Déterminer les paramètres de structure météorologique et atmosphérique M et γ . D'après la Recommandation UIT-R P.617, les deux paramètres pour le climat 6 sont:

$$M = 29,73 \text{ dB}; \quad \gamma = 0,27 \text{ km}^{-1} \quad (171)$$

Étape 3: Calculer l'angle de diffusion θ . La diminution annuelle médiane du coïndice par rapport à la surface dans une couche de 1 km d'épaisseur pour la région environnante peut être estimée à l'aide de la Recommandation UIT-R P.453, ce qui donne:

$$\Delta N \approx 40 N - \text{unidades} \quad (172)$$

Le facteur de rayon équivalent de la Terre pour des conditions de réfraction médianes est donc:

$$k = 1/(1 - a \Delta N \times 10^{-6}) \cong 4/3 \quad (173)$$

où a est le rayon réel de la Terre, à savoir 6 370 km. Les angles de site de l'horizon à l'émetteur et au récepteur sont respectivement:

$$\theta_t = (h'_1 - h_1)/d_1 - d_1 \cdot h_1/(2ka) \cong 0,2 \text{ mrad} \quad (174)$$

$$\theta_r = (h'_2 - h_2)/d_2 - d_2 \cdot h_2/(2ka) \cong 6,7 \text{ mrad} \quad (175)$$

D'après la Recommandation UIT-R P.617:

$$\theta = d \times 10^3 / (ka) + \theta_t + \theta_r = 47,7 \text{ mrad} \quad (176)$$

Étape 4: Estimer l'effet L_N de l'altitude du volume commun. D'après la Recommandation UIT-R P.617, avec $\gamma(\text{km}^{-1}) = 0,27$ (climat 6):

$$H = 10^{-3} \theta d/4 = 4,1 \text{ km} \quad (177)$$

$$h = 10^{-6} \theta^2 ka/8 = 2,4 \text{ km} \quad (178)$$

$$L_N = 20 \log(5 + \gamma H) + 4,34 \gamma h = 18,56 \text{ dB} \quad (179)$$

Étape 5: Estimer le facteur de conversion $Y(q)$ de non-dépassement pour le pourcentage q . Une équation de la Recommandation UIT-R P.617 fournit une valeur approchée de $Y(q)$:

$$Y(90) = -2,2 - (8,1 - 2,3 \times 10^{-4} f) \exp(-0,137 h) = -7,9 \text{ dB} \quad (180)$$

et selon la même Recommandation:

$$Y(q) = C(q) \cdot Y(90) \quad \text{dB} \quad (181)$$

avec $C(50) = 0$, $C(99) = 1,82$ et $C(99,9) = 2,41$. D'où:

$$Y(50) = 0 \text{ dB}; \quad Y(99) = -14,41 \text{ dB}; \quad Y(99,9) = -19,1 \text{ dB} \quad (182)$$

Étape 6: Évaluer la perte de couplage L_c entre l'antenne et le milieu. D'après la Recommandation UIT-R P.617:

$$L_c = 0,07 \cdot \exp[0,055(G_t + G_r)] = 1,52 \quad \text{dB} \quad (183)$$

Étape 7: Estimer l'affaiblissement de transmission annuel moyen $L(q)$ qui n'est pas dépassé pendant $q\%$ du temps. Selon l'équation (169), avec $M = 29,73$ (climat 6):

$$L(50) = 152,9 \quad \text{dB}; \quad L(90) = 160,8 \quad \text{dB} \quad (184)$$

$$L(99) = 167,3 \quad \text{dB}; \quad L(99,9) = 172 \quad \text{dB} \quad (185)$$

Les mesures de l'affaiblissement de transmission annuel sont:

$$L_{meas}(50) = 151,8 \quad \text{dB}; \quad L_{meas}(90) = 162,8 \quad \text{dB} \quad (186)$$

$$L_{meas}(99) = 169,8 \quad \text{dB} \quad (187)$$

et les erreurs de prévision: 0,9 dB, -2 dB et -2,5 dB pour 50%, 90% et 99% du temps respectivement.

La Recommandation UIT-R P.617 fournit également une méthode pas à pas pour passer de la distribution annuelle à la distribution pour le mois le plus défavorable.

Étape 8: Déterminer la différence $\Delta L(q)$ entre l'affaiblissement de transmission annuel moyen et l'affaiblissement de transmission pour le mois le plus défavorable pour $q\%$ du temps. La distance équivalente est donnée par:

$$d_e = \theta ka \times 10^{-3} = 400 \text{ km} \quad (188)$$

La Recommandation UIT-R P.617 donne les valeurs suivantes de $\Delta L(q)$ pour le climat 6 et une distance équivalente de 400 km:

$$\Delta L(50) = 5,9 \quad \text{dB}; \quad \Delta L(90) = 5,1 \quad \text{dB} \quad (189)$$

$$\Delta L(99) = 4,4 \quad \text{dB}; \quad \Delta L(99,9) = 4,0 \quad \text{dB} \quad (190)$$

Étape 9: Estimer l'affaiblissement de transmission moyen pour le mois le plus défavorable $L_w(q)$ pour $q\%$ du temps en ajoutant la différence $\Delta L(q)$ à l'affaiblissement de transmission moyen $L(q)$:

$$L_w(50) = 158,6 \quad \text{dB}; \quad L_w(90) = 165,9 \quad \text{dB} \quad (191)$$

$$L_w(99) = 171,5 \quad \text{dB}; \quad L_w(99,9) = 176 \quad \text{dB} \quad (192)$$

On ne dispose pas de données pour le mois le plus défavorable.

4.2.3 Résultats des essais

Des essais ont été effectués pour les différentes méthodes [Zhang, 1988; Rice *et al.*, 1967 et Boithias et Battesti, 1965]. Le Tableau 6 présente les résultats de ces essais. Les méthodes susmentionnées ont été nommées I, II et III par souci de simplicité.

TABLEAU 6
Erreurs de prévision pour les trajets troposphériques

N° du trajet	Pourcentage du temps								
	50%			90%			99,9%		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
908	2,4	0,1	6,9	2,1	-2,4	5,3			
1440	-5,5	-10,5	-5,7	-6,9	-11,1	-9,0	-9,0	-12,7	-12,7
1441	-0,9	-6,0	-1,1	-1,1	-4,9	-2,4	-0,8	-3,8	-3,0
2064	1,7	-3,2	1,9	3,5	0,7	2,4	4,7	3,6	2,6
2272	-4,4	-6,3	1,5	-5,6	-10,2	-1,5	-5,3	-12,2	-2,8
2273	5,0	3,3	10,8	5,5	1,2	9,8	5,5	-1,0	8,6
2304	0,7	0,4	11,1	-2,3	-5,2	6,6	-2,7	-7,7	4,9
2305	0,6	-3,8	3,7	-0,1	-5,5	1,2	0,6	-5,8	0,3
2306	-4,9	-5,1	5,5	-3,1	-5,9	6,0	-0,8	-5,6	7,3
2307	0,9	-3,3	4,1	3,9	-1,3	5,5	7,3	1,2	7,6
4901	2,9	-0,2	6,1	3,3	2,7	8,2	6,3	7,7	12,6
5006	3,5	-1,2	5,0	7,1	3,5	7,2	4,1	1,4	3,0
5009	-2,0	-6,0	3,9	-2,3	-4,8	2,5	-6,9	-8,4	-3,2
9009	0,9	-0,9	14,9	-0,7	-2,7	12,4	-1,4	-3,6	10,8
9018	2,5	-1,6	2,5	1,1	0,1	1,1	0,3	1,9	0,3
9019	0,7	-1,2	5,6	1,5	0,8	5,4			
9034	3,7	1,8	10,8	1,8	-1,4	7,6	1,5	-2,9	6,1
9041	0,0	-2,6	6,4	7,4	5,9	10,0	10,5	10,0	10,0
9042	0,0	-1,1	-0,5	-4,1	-4,6	-4,7	-7,9	-7,9	-8,6
9043	0,0	0,7	4,6	6,9	7,6	-9,4			
9045	-0,4	-2,8	4,0	-3,2	-7,7	-0,7	-2,7	-8,9	-1,7
9046	0,1	-2,0	4,5	0,6	-3,2	3,9	2,5	-2,6	4,8
A	-3,7	-9,1	-2,7						
B	-0,6	-4,3	1,4						
C	-3,6	-7,6	-0,5						
Erreurs moyennes	0,0	-2,9	4,2	0,7	-2,2	3,9	0,3	-3,0	2,5
Erreurs quadratiques moyennes	2,7	4,4	6,2	4,0	5,2	6,5	5,2	6,8	7,0

4.2.4 Affaiblissement combiné et sa variabilité

4.2.4.1 Effet de la fréquence

Il est généralement admis que l'affaiblissement de transmission médian à long terme entre des antennes isotropes (affaiblissement de transmission de référence) croît avec le cube de la fréquence jusqu'à 3 GHz, et proportionnellement à l'affaiblissement par rapport à l'espace libre. En prenant une période d'échantillonnage inférieure à une heure, on a déterminé que la dépendance, vis-à-vis de la fréquence, de l'affaiblissement par rapport à l'espace libre varie entre f^2 et $f^{1/3}$ [Eklund et Wickerts, 1968]. En outre, des mesures effectuées en France à 460 et 2 220 MHz sur deux distances, 325 km et 165 km, ont montré que la loi de dépendance avec la fréquence est environ en f^2 pendant 1% du temps et en f pendant 99% du temps sur la liaison longue, et en

$f^{1,5}$ pendant 1% du temps et en $f^{0,5}$ pendant 99% du temps sur la liaison courte. Cette dépendance était légèrement plus élevée en été qu'en hiver, tout particulièrement sur la liaison courte [Boithias et Battesti, 1983].

4.2.4.2 Variations de l'affaiblissement de transmission à court terme et à moyen terme

On observe des variations d'intensité de champ lentes et rapides. Les évanouissements lents sont dus à des modifications générales des conditions de réfraction dans l'atmosphère et les évanouissements rapides au déplacement de zones d'irrégularités peu étendues. Les distributions des médianes horaires de l'affaiblissement de transmission, qui sont à peu près log-normales et d'écart types compris entre 4 et 8 dB selon le climat, donnent une bonne représentation des variations lentes.

Les évanouissements rapides sont le résultat de la superposition de plusieurs composantes incohérentes variables, dont l'amplitude obéit à une loi de distribution de Rayleigh. On constate que cette hypothèse est pratiquement vérifiée si on analyse la répartition pendant des intervalles de temps de durée maximale égale à 5 min. Si d'autres types de signaux contribuent au signal reçu, cette répartition se trouve modifiée. On a observé des évanouissements rapides, brusques et profonds, au moment où une perturbation frontale affecte une liaison. La réflexion des ondes sur un aéronef peut ainsi provoquer des évanouissements rapides très marqués.

Les évanouissements rapides se produisent plusieurs fois par minute dans les bandes d'ondes métriques et plusieurs fois par seconde dans les bandes d'ondes décimétriques. La fréquence d'évanouissement rapide a été étudiée du point de vue de la fonction d'autocorrélation dans le temps, ce qui conduit à une «fréquence moyenne d'évanouissement» pendant les brefs instants où le signal est stationnaire. On a observé que la valeur médiane de la fréquence moyenne d'évanouissement croît presque proportionnellement à la longueur du trajet et à la fréquence de la porteuse et décroît légèrement quand le diamètre de l'antenne augmente. La rapidité des évanouissements revêt une importance particulière dans le cas de l'émission de signaux numériques. L'effet des évanouissements rapides peut être atténué grâce à la réception en diversité.

La subdivision des évanouissements en deux composantes (lente et rapide) est assez arbitraire et ne vise qu'à faciliter l'analyse mathématique de ce phénomène. Il convient d'additionner les variations rapides et les variations lentes du signal reçu. On peut ainsi déduire la loi résultante du signal reçu, tout en gardant à l'esprit que la valeur moyenne de la variable de Rayleigh est elle-même une variable aléatoire obéissant à une loi log-normale. On dispose, pour les applications pratiques, d'une méthode graphique permettant de combiner les distributions d'évanouissements lents et rapides [Panther, 1972].

4.2.4.3 Variations saisonnières et journalières

Dans la plupart des conditions climatiques, l'affaiblissement de transmission présente des variations saisonnières importantes au cours de l'année. S'agissant des variations journalières, l'affaiblissement de transmission atteint son maximum en fin d'après-midi et son minimum dans la matinée.

Sous les climats tempérés, les médianes mensuelles des affaiblissements ont tendance à être plus élevées en hiver qu'en été. Les valeurs sont comprises entre 10 et 15 dB sur des trajets terrestres de 150-200 km, mais elles diminuent lorsque la distance augmente. À l'inverse, les variations journalières sont plus marquées en été, les valeurs étant comprises entre 5 et 10 dB sur des trajets terrestres de 100-200 km. Les trajets maritimes ayant plus de risques que les trajets terrestres d'être perturbés par la superréfraction et les couches élevées, ils présentent des variations plus importantes. Il en est parfois de même dans les régions côtières à terrain plat et peu élevé.

Dans les climats désertiques secs et chauds, l'affaiblissement est maximal en été. La variation annuelle des médianes mensuelles peut se situer entre 15 et 20 dB sur des trajets de 200-300 km, mais elle diminue également lorsque la distance augmente. Sous ces climats, on observe des variations de valeurs médianes horaires qui dépassent 20 dB.

Sous les climats équatoriaux, les variations annuelles et journalières sont beaucoup plus faibles, l'affaiblissement de transmission étant maximal pendant la saison des pluies.

Dans les climats de mousson, où des mesures ont été faites (Sénégal, Barbade), on observe deux niveaux élevés par an, l'un pendant la saison sèche, l'autre pendant la saison des pluies. À noter que, sous ces climats, les valeurs de N_S (coïndice de réfraction à proximité de la surface de la Terre) sont maximales pendant la saison des pluies.

5 Distorsion due aux effets de la propagation

La distorsion due aux retards de propagation dans des conditions de trajets multiples produit un bruit d'intermodulation sur les liaisons analogiques et des brouillages intersymboles sur les liaisons numériques. Le temps de propagation par trajets multiples T_m est une mesure de la largeur du signal reçu dans le domaine temporel lorsqu'une fonction impulsionnelle unique est émise dans le canal. Son inverse, appelé largeur de bande de cohérence B_c , détermine, d'un point de vue pratique, la largeur de bande disponible ou transmissible [Hall, 1979; Boithias, 1983]. Si la largeur de bande du signal émis B est bien inférieure à B_c ou si la durée d'impulsion d'un signal numérique émis est nettement plus longue que T_m , il n'y a pas d'effet majeur. En revanche, lorsque l'on augmente progressivement la largeur de bande du signal analogique ou le débit binaire du signal numérique, le signal reçu subit une distorsion de plus en plus importante, de sorte qu'apparaît un bruit croissant d'intermodulation dans les systèmes analogiques et un taux d'erreur croissant — dû à des brouillages intersymboles — dans les systèmes numériques.

Le temps de propagation par trajets multiples sur les liaisons troposphériques est classiquement compris entre 0,1 et 1,0 μ s, en fonction de la configuration géométrique du trajet et de l'ouverture de faisceau des antennes. Une méthode théorique permet de calculer ce paramètre [Bello, 1969], mais, outre sa complexité mathématique, son adéquation avec les données expérimentales n'est que partielle [Roda, 1988]. On peut obtenir une valeur approchée grossière de T_m à partir des décalages de phase liés à la taille du volume commun des faisceaux des antennes, c'est-à-dire la différence Δd donnée par:

$$\Delta d(m) = (\Omega^2 + \Omega\theta) \frac{d \times 10^3}{2} \quad (193)$$

où Ω désigne l'ouverture du faisceau d'antenne à 3 dB, et θ et d les paramètres indiqués à la Fig. 14, les angles étant mesurés en mrad et la distance en km. T_m (μ s) peut donc être calculé par la formule suivante:

$$T_m(\mu s) = \Delta d / (3 \times 10^2) \quad (194)$$

En ce qui concerne les liaisons analogiques, l'évaluation du bruit d'intermodulation est un problème assez complexe, qui n'a pas encore été totalement résolu. On dispose toutefois de méthodes approchées [Medhurst, 1959; Beach et Trecker, 1963 et Sunde, 1964]. Des études expérimentales effectuées en France [Battesti et Boithias, 1971] montrent que:

- une augmentation du gain des antennes permet d'élargir la bande transmissible dans une mesure telle que la baisse de gain augmente également (c'est-à-dire pour des gains supérieurs à environ 30 dB);
- les autres conditions restant égales, la largeur de bande transmissible dépend de la structure de l'atmosphère et donc de la zone climatique considérée;
- la largeur de bande utilisable diminue lorsque la distance augmente, mais suivant une loi qui n'est pas la même sous tous les climats;
- la largeur de bande utilisable est plus petite si l'angle de départ est positif; elle est plus grande si cet angle est négatif.

Sur les liaisons numériques de débit binaire inférieur à 2 Mbit/s, la distorsion par trajets multiples n'est généralement pas gênante. En revanche, pour des débits binaires supérieurs, les erreurs binaires augmentent en fonction du rapport T_m/T , où T désigne la durée des symboles émis. L'augmentation du taux d'erreur sur les bits (TEB) est négligeable pour T_m/T inférieur à 0,2 ~ 0,3 et croît rapidement au-delà de cette limite. Pour combattre la distorsion par trajets multiples, le plus efficace est de combiner la réception en diversité et

l'égalisation adaptative. On peut aussi, pour limiter cette distorsion, choisir un angle de diffusion et une ouverture de faisceau d'antenne aussi petits que possible, de façon à réduire au minimum la plus grande différence de trajet dans le volume commun.

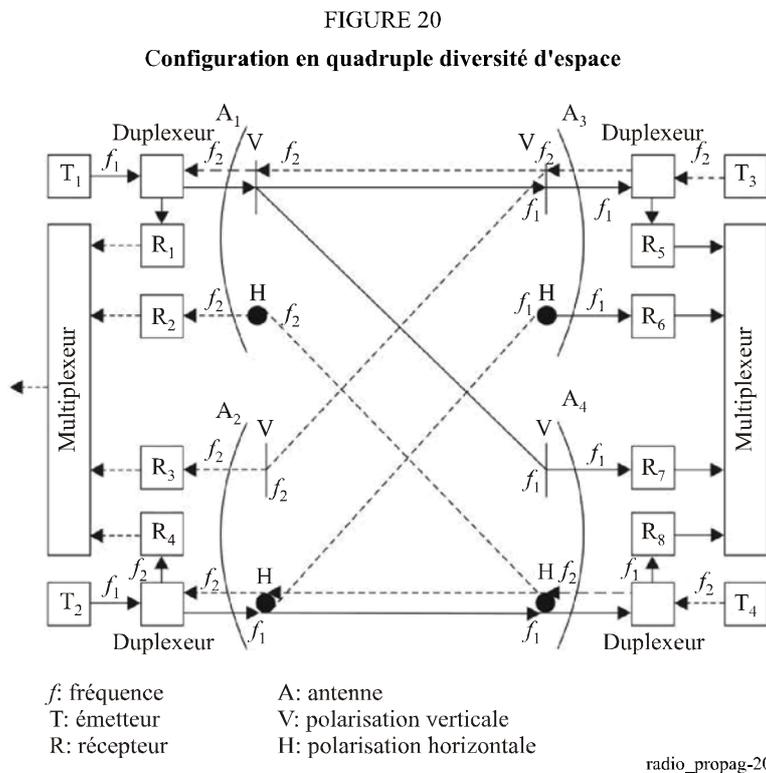
6 Techniques avec diversité

Le terme diversité désigne la réception simultanée de deux signaux ou plus transportant la même information. Pour pallier les effets de la variabilité du signal reçu sur les liaisons troposphériques, il faut nécessairement recourir à la réception en diversité. Il faut en outre, pour améliorer la réception, que les signaux de diversité soient le moins corrélés possible. Les configurations de diversité types sont: la diversité d'espace, la diversité de fréquence, la diversité angulaire, la diversité de polarisation et la diversité dans le temps.

6.1 Diversité d'espace

C'est la configuration la plus couramment utilisée. En règle générale, les systèmes actuels utilisent la diversité quadruple espace-polarisation, avec deux antennes en polarisations croisées à chaque extrémité pour séparer les deux signaux arrivant à chaque antenne de réception, comme illustré à la Fig. 20.

La conception de ce type de système à diversité quadruple est relativement complexe, étant donné que les trajets radioélectriques ne sont que partiellement indépendants et qu'il faut choisir avec soin l'espacement des antennes pour obtenir une décorrélation acceptable [Larsen, 1980]. La double diversité d'espace est parfois utilisée. L'économie réalisée avec une extrémité à double diversité par rapport à la quadruple diversité se fait au dépens de la fiabilité, étant donné qu'un système à quadruple diversité est toujours opérationnel (avec une qualité de fonctionnement réduite) si l'un de ses émetteurs tombe en panne [Roda, 1988].



L'effet de la diversité d'espace a été étudié par Fehlhauer et Grosskopf [1967]. L'espacement adéquat Δh des deux antennes de réception d'un système à diversité d'espace dépend de l'échelle de longueur, définie par la fonction de corrélation d'espace, et du diamètre des antennes de réception. Du fait de la nature statistique de l'échelle de longueur, il convient d'utiliser une valeur dépassée pendant 1% du temps. La Recommandation

UIT-R P.617 fournit des formules empiriques permettant de déterminer Δh , à la fois pour l'espacement horizontal et pour l'espacement vertical.

6.2 Diversité de fréquence

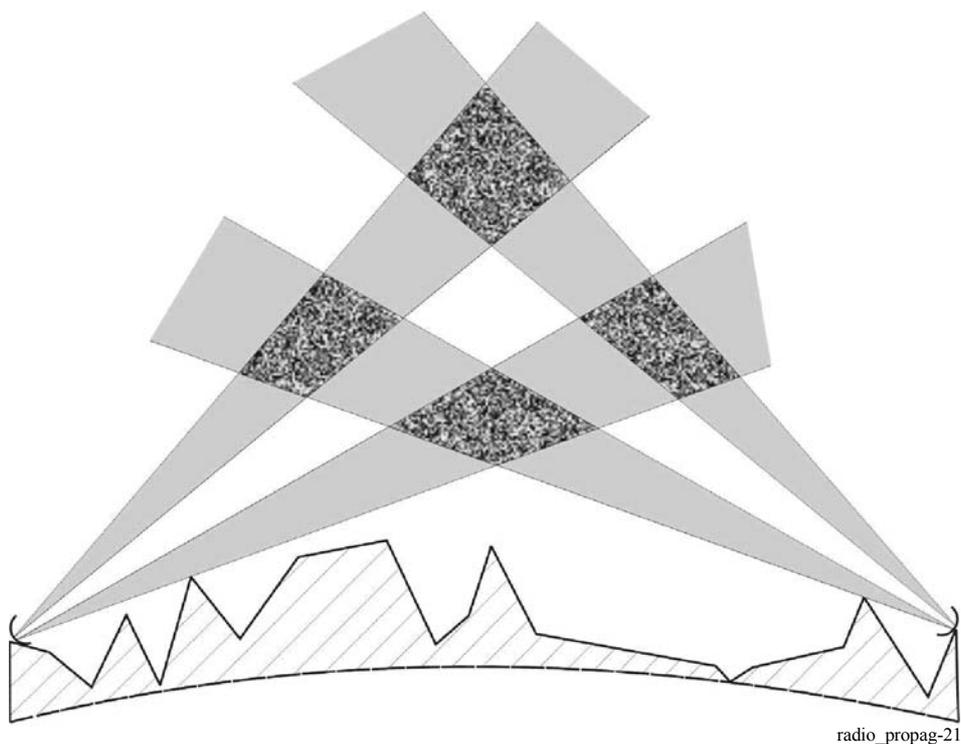
Du fait de l'encombrement du spectre radioélectrique, cette configuration n'est généralement pas recommandée. La variation du coefficient de corrélation de la fréquence en fonction de la longueur du trajet a fait l'objet d'une étude [Fehlhaber, 1967]. Le même auteur a également étudié l'espacement approprié en fréquence Δf . Ces recherches ont abouti à une formule pratique, présentée dans la Recommandation UIT-R P.617, qui donne Δf en fonction de la fréquence, du diamètre d'antenne, de l'angle de diffusion et de l'échelle de longueur dans le sens vertical.

6.3 Diversité angulaire

On utilise, au niveau de l'antenne de réception, des alimentations alignées verticalement afin de produire plusieurs volumes communs situés les uns au-dessus des autres, comme pour la diversité d'espace verticale. Dans les systèmes à double diversité, le signal est émis dans un faisceau et reçu dans deux faisceaux distincts avec des angles d'arrivée différents. Les deux faisceaux sont parfois alignés horizontalement, mais on a observé que l'alignement vertical donnait de bien meilleurs résultats [Roda, 1988]. Dans les systèmes à quadruple diversité, le signal est émis à la même fréquence dans deux faisceaux distincts, ce qui crée quatre volumes communs, comme illustré par la Fig. 21.

Les différents trajets sont certes décorrelés de façon acceptable, mais il convient d'être vigilant dès lors qu'ils subissent des affaiblissements différents. La Recommandation UIT-R P.617 donne une formule pratique qui permet de déterminer l'espacement angulaire des faisceaux.

FIGURE 21
Diversité angulaire



6.4 Diversité de polarisation

Des essais expérimentaux ont montré que cette configuration n'apporte pas de gain de diversité. Cela étant, lorsqu'elle est combinée avec la diversité d'espace (voir Fig. 21), la diversité de polarisation permet de séparer deux signaux émis à la même fréquence avec des polarisations croisées en utilisant une alimentation à sondes orthogonales au niveau de l'antenne de réception.

6.5 Diversité dans le temps

Le signal d'information est répété à des intervalles de temps supérieurs à l'inverse de la fréquence moyenne des évanouissements. Dans des conditions de propagation par trajets multiples, on peut obtenir une sorte de diversité dans le temps, lorsque des signaux de largeur de bande suffisante $B > B_c$ sont émis de sorte que les trajets multiples puissent être vus comme la production d'une série d'échos. On peut mettre en œuvre cette diversité par trajets multiples, appelée diversité implicite par Roda [1988], au moyen de techniques spéciales de modulation, de codage des signaux, etc. Les bonds de fréquence et l'égalisation adaptative sont des exemples pratiques de cette technique.

6.6 Combinaison de techniques

On dénombre quatre types pratiques de systèmes combineurs de diversité:

- a) La *diversité avec balayage*: un dispositif de sélection balaye les canaux dans un ordre fixe jusqu'à ce qu'il trouve un signal d'intensité supérieure à un seuil prédéfini, utilise ce signal jusqu'à ce qu'il retombe sous le seuil, puis balaye les autres canaux dans le même ordre fixe jusqu'à ce qu'il trouve de nouveau un signal d'intensité supérieure au seuil.
- b) La *diversité avec sélection*: dans cette version améliorée de la technique de commutation décrite ci-dessus, on choisit le meilleur signal disponible.
- c) La *diversité avec rapport maximal*: avant d'être combinés, les signaux de diversité sont amplifiés de façon inversement proportionnelle à la puissance du bruit, le but étant d'obtenir un rapport signal/bruit combiné qui, à tout moment, est égal ou supérieur au meilleur des rapports signal/bruit.
- d) La *diversité équi-gain*: tous les signaux de diversité sont combinés après qu'ils ont été amplifiés pour présenter le même gain.

Les Fig. 22 et 23 comparent les techniques avec sélection, avec rapport maximal et équi-gain respectivement pour la diversité double et la diversité quadruple [Brennan, 1959].

Le multiplexeur à rapport maximal est le plus utilisé. Cela étant, la technique équi-gain requiert un équipement et une maintenance plus simples, et ce pour une baisse minimale de la qualité de fonctionnement (environ 1 dB pour la diversité quadruple).

6.7 Gain de diversité

Les Fig. 22 et 23 montrent que l'utilisation de la diversité entraîne un gain de diversité pour chaque pourcentage de temps et que ce gain augmente lorsque le pourcentage de temps croît. Par exemple, en diversité double avec sélection, un signal de 28 dB en deçà de la médiane pour 99,9% du temps est élevé à 13 dB en deçà de la médiane, ce qui correspond à un gain de diversité de 15 dB.

Il convient toutefois de souligner que le terme «gain de diversité», couramment employé pour désigner l'efficacité des diverses configurations de diversité, ne correspond pas à une définition standard. Par exemple, dans certains cas, ce terme désigne la diversité qui permet de réduire la fraction de temps pendant laquelle le signal chute à des niveaux inexploitables.

FIGURE 22
Courbes de distribution en diversité double

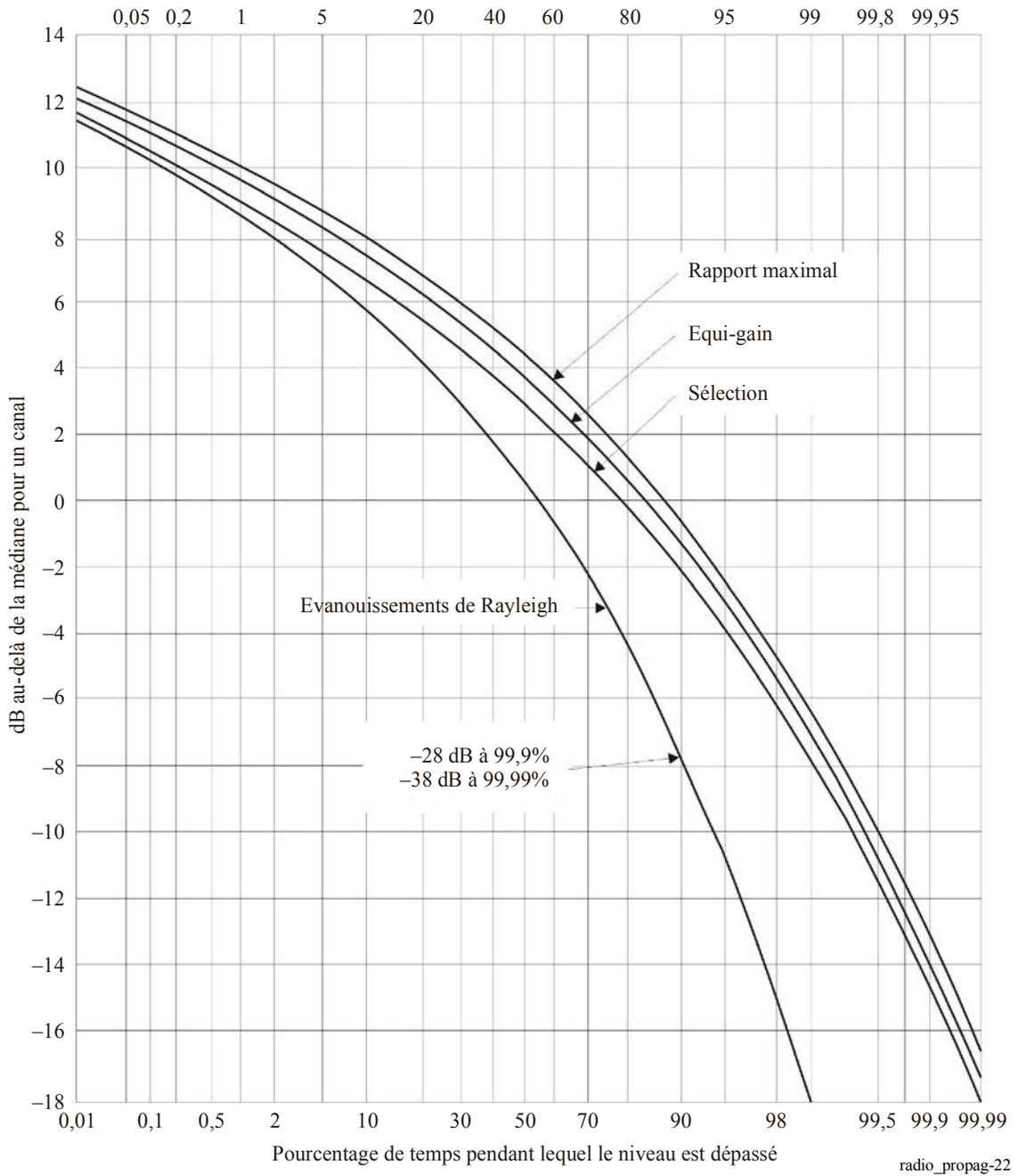
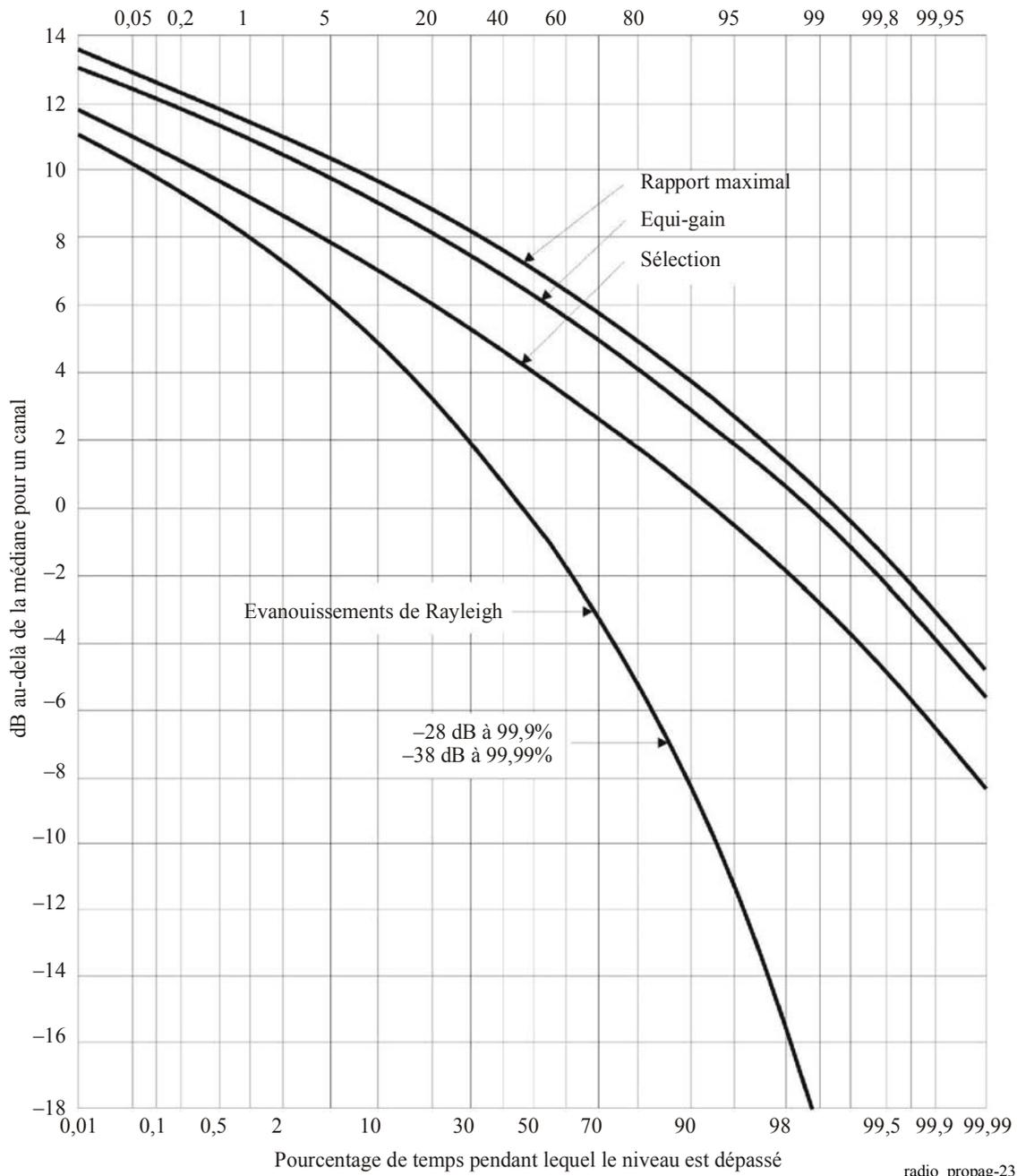


FIGURE 23
 Courbes de distribution en diversité quadruple



Références

- ASSIS, M. S. [1971] A simplified solution to the problem of multiple diffraction over rounded obstacles. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. 19, p. 292-295.
- ASSIS, M. S. [1982] Effect of lateral profile on diffraction by natural obstacles. *Radio Sci.*, Vol. 17, 5, p. 1051-1054.
- ASSIS, M. S. [1986] Tropospheric propagation at low latitude areas. IEEE Global Telecommunications Conference, Houston, Texas, États-Unis d'Amérique.
- BARNETT, W. T. [1979] Microwave line-of-sight propagation with and without frequency diversity. *Bell BSTJ*, Vol. 49, 8, p. 1827-1871.
- BATTESTI, J. et BOITHIAS, L. [1971] Nouveaux éléments sur la propagation par hétérogénéités de l'atmosphère. *Ann. des Télécomm.*, Vol. 26, p. 15-20.
- BEACH, C. D. et TRECKER, J. M. [1963] A method for predicting interchannel modulation due to multipath propagation in FM and PM tropospheric radio systems. *BSTJ*, Vol. 42, p. 1-36.
- BELLO, P. A. [1969] A troposcatter channel model. *IEEE Trans. Comm. Techn.*, Vol. 17, p. 130-137.
- BOITHIAS, L. [1983] *Propagation des Ondes Radioélectriques dans l'Environnement Terrestre*. Editions Dunod, Paris, France.
- BOITHIAS, L. et BATTESTI, J. [1964] Étude expérimentale de la baisse de gain d'antenne dans les liaisons transhorizon. *Ann. des Télécomm.*, Vol. 19, 9-10, p. 221-229.
- BOITHIAS, L. et BATTESTI, J. [1965] Les faisceaux hertziens transhorizon de haute qualité. *Ann. des Télécomm.*, Vol. 20, 7-8, p. 138-150.
- BOITHIAS, L. et BATTESTI, J. [1983] Propagation due to tropospheric inhomogeneities. *Proc. IEE*, Vol. 130, Part F, 7, 657-664.
- BOOKER, H. G. et GORDON, W. E. [1950] A theory of radio scattering in the troposphere. *Proc. IRE*, Vol. 38, p. 401-412.
- BORN, M. et WOLF, E. [1970] *Principles of optics*. Pergamon Press, Oxford, Royaume-Uni.
- BREMMER, H. [1949] *Terrestrial Radio Waves*. Elsevier Publishing Co., Amsterdam, Pays-Bas.
- BRENNAN, D. G. [1959] Linear diversity combining techniques. *Proc. IRE*, Vol. 47, p. 1075-1102.
- BULLINGTON, K. [1947] Radio propagation at frequencies above 30 Mc/s. *Proc. IRE*, Vol. 35, 10, p. 1122-1136.
- CRYSDALE, J. H. [1958] Comparison of some experimental terrain diffraction losses with predictions based on Rice's theory for diffraction by a parabolic cylinder. *IRE Trans. Ant. Prop.*, Vol. 6, p. 293-295.
- DEYGOUT, J. [1966] Multiple knife-edge diffraction of microwaves. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. 14, p. 480-489.
- DOUGHERTY, H. T. et MALONEY, L. J. [1964] Application of diffraction by convex surfaces to irregular terrain situations. *Radio Sci.*, J. Res. NBS, Vol. 68D, p. 239-250.
- DOUGHERTY, H. T. et WILKERSON, R. E. [1967] Determination of antenna height for protection against microwave diffraction fading. *Radio Sci.*, Vol. 2, p. 161-165.
- DU CASTEL, F. [1966] *Tropospheric radiowave propagation beyond the horizon*. Pergamon Press, New York, États-Unis d'Amérique.
- EKLUND, F. et WICKERTS, S. [1968] Wavelength dependence of microwave propagation far beyond the radio horizon. *Radio Sci.*, Vol. 3, 11, 1066-1074.
- ELIADES, D. E. [1993] Alternative derivation of the cascaded cylinder diffraction model. *Proc. IEE*, Part H, Vol. 140, p. 279-284.
- EPSTEIN J. et PETERSON, D. W. [1953] An experimental study of wave propagation at 850 Mc/s. *Proc. IRE*, Vol. 41, 5, p. 595-611.

- FEHLHABER, L. [1967] Selektiver Schwund, übertragbare Bandbreite und Frequenzdiversity auf troposphärischen Scatterstrecken im Frequenzbereich zwischen 1 GHz und 10 GHz. *Tech. Ber. FTZ*, No. 5589.
- FEHLHABER, L. et GROSSKOPF, J. [1967] Das elektromagnetische Feld am Empfangsort einer troposphärischen Scatterstrecke. *NTZ*, Vol. 20, p. 511-520.
- FOCK, V. A. [1965] *Electromagnetic diffraction and propagation problems*. Pergamon Press, New York, États-Unis d'Amérique.
- FRIIS, H. T., CRAWFORD, A. B. et HOGG, D. C. [1957] A reflection theory for propagation beyond the horizon. *BSTJ*, Vol. 36, p. 627-644.
- FURUTSU, K. [1963] On the theory of radio wave propagation over inhomogeneous earth. *J. Res. NBS*, Vol. 67D, p. 39-62.
- FURUTSU, K. et WILKERSON, R. E. [1970] Obstacles gain in radio-wave propagation over inhomogeneous earth. *Proc. IEE*, Vol. 117, p. 887-893.
- FURUTSU, K. et WILKERSON, R. E. [1971] Optical approximation for the residue series for terminal gain in radio-wave propagation over inhomogeneous earth. *Proc. IEE*, Vol. 118, p. 1197-1202.
- GIOVANELI, C. L. [1984] An analysis of simplified solutions for multiple knife-edge diffraction. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. 32, p. 297-301.
- HALL, M. P. M. [1979] *Effects of the troposphere on radio communications*. Peter Peregrinus Ltd, Stevenage, Royaume-Uni.
- HUFFORD, G. A. [1952] An integral equation approach to the problem of wave propagation over an irregular surface. *Quart. J. Appl. Math.*, Vol. 9, p. 391-404.
- LARSEN, R. [1980] Quadruple space diversity in troposcatter systems. *Marconi Rev.*, p. 28-55.
- MEDHURST, R. G. [1959] Echo distortion in frequency modulation. *Electron. Radio Eng.*, Vol. 36, p. 253-259.
- MILLINGTON, G. [1949a] Ground wave propagation over an inhomogeneous smooth earth. *Proc. IEE*, Part III, Vol. 96, p. 53-64.
- MILLINGTON, G. [1949b] Ground wave propagation across a land/sea boundary. *Nature*, Vol. 163, p. 128.
- MILLINGTON, G. et ISTED, G. A. [1950] Ground wave propagation over an inhomogeneous smooth earth. *Proc. IEE*, Part III, Vol. 97, p. 209-222.
- MILLINGTON, G.; HEWITT, R. et IMMIIRZI, F. S. [1962] Double knife-edge diffraction in field-strength prediction. *Proc. IEE*, Vol. 109C, p. 419-429.
- MONTEATH, G. D. [1951] Applications of the compensation theorem to certain radiation and propagation problems. *Proc. IEE*, Vol. 98, p. 23-30.
- OTT, R. H. [1971] An alternative integral equation for propagation over irregular terrain II. *Radio Sci.*, Vol. 6, p. 429-435.
- OTT, R. H. et BERRY, L. A. [1970] An alternative integral equation for propagation over irregular terrain. *Radio Sci.*, Vol. 5, p. 767-771.
- PANTHER, P. F. [1972] *Communications systems design – Line-of-sight and troposcatter systems*. Mcgraw-Hill, New York, États-Unis d'Amérique.
- POGOZELSKI, R. J. [1980] A note on some common diffraction links models. *Radio Sci.*, Vol. 17, p. 1536-1540.
- RICE, P. L.; LONGLEY, A. G.; NORTON, K. A. et BARSIS, A. P. [1965 (Rev. 1967)] Transmission loss predictions for tropospheric communications circuits. NBS Tech. Note 101, Vols. 1 and 2, U.S. Dep. of Commerce. (disponible sous la référence AD687-820, Natl. Tech Inf. Serv., Springfield, Va.)
- RODA, G. [1988] *Troposcatter radio links*. Artech House, Boston, États-Unis d'Amérique.
- SHARPLES, P. A. et MEHLER, M. J. [1989] Cascaded cylinder model for predicting terrain diffraction loss at microwave frequencies. *Proc. IEE*, Part H, Vol. 136, p. 331-337.

- SUNDE, E. D. [1964] Intermodulation distortion in analog FM troposcatter systems. *BSTJ*, Vol. 43, p. 399-435.
- SURENIAN, D. [1965] Experimental results of angle diversity system tests. *IEEE Trans. Comm. Techn.*, Vol. 13, p. 208-219.
- VOGLER, L. E. [1982] An attenuation function for multiple knife-edge diffraction. *Radio Sci.*, Vol. 17, **6**, p. 1541-1546.
- WAIT, J. R. [1974] Recent analytical investigations of electromagnetic ground wave propagation over inhomogeneous earth models. *Proc. IEEE*, Vol. 62, p. 1061-1072.
- WAIT, J. R. et CONDA, A. M. [1959] Diffraction of electromagnetic waves by smooth obstacles for grazing angles. *J. Res. NBS*, Vol. 63D, p. 181-197.
- ZHANG, M. [1977] Tropospheric scatter propagation. Monograph of China Research Institute of Radiowave Propagation.
- ZHANG, M. [1988] An Improved method for predicting the transmission loss due to troposcatter. International Symposium on Radio Propagation, Beijing, République populaire de Chine.

PARTIE 3

LIAISONS OPTIQUES EN ESPACE LIBRE

1 Introduction

Cette partie du Manuel de l'UIT-R concerne la planification et la conception des liaisons optiques en espace libre (FSO). Elle apporte des informations de base sur les méthodes de calcul des diverses contributions à l'affaiblissement global sur de telles liaisons, tel qu'indiqué dans la Recommandation UIT-R P.1817. Figurent également dans cette partie une présentation succincte de certains aspects complémentaires à prendre en compte dans la conception des liaisons FSO ainsi qu'un exemple d'application.

2 Études préalables à la conception d'une liaison FSO

Lors de la conception des liaisons FSO, il convient de prendre en compte les paramètres suivants: affaiblissement dû à l'absorption, à la diffusion et à la turbulence de l'atmosphère, microclimat et effets locaux, distance de la liaison, dépointage, choix de la longueur d'onde, débits binaires, problèmes de sécurité oculaire et affaiblissement par la lumière solaire ambiante.

Les systèmes FSO nécessitent une visibilité directe (LOS) et utilisent l'expansion de faisceau et un faisceau collimaté. Dans ces conditions, lors des essais, le dégagement nécessaire entre le centre du faisceau et tout obstacle est égal au rayon du faisceau. La contrainte de dégagement diffère donc de celle des liaisons RF, pour lesquelles elle est fonction des zones de Fresnel.

Le premier inconvénient des systèmes FSO est leur vulnérabilité vis-à-vis des effets atmosphériques (affaiblissement, scintillation, etc.), qui peuvent diminuer la disponibilité de la liaison. De plus, du fait de l'étrécissement du faisceau, l'alignement du terminal de communication laser est plus déterminant qu'il ne l'est habituellement pour les systèmes RF.

L'étude du bilan de puissance est un élément essentiel de la conception des liaisons FSO. La marge de liaison, $M_{liaison}$ (dB), qui désigne la puissance disponible au-delà de la sensibilité du récepteur, peut s'exprimer comme suit:

$$M_{liaison} = P_e - S_r - A_{géo} - A_{atmo} - A_{scintillation} - A_{système} \quad (195)$$

où:

- P_e : puissance totale de l'émetteur (dBm)
- S_r : sensibilité du récepteur, qui dépend de la largeur de bande (débit binaire) (dBm)
- $A_{géo}$: affaiblissement géométrique de la liaison dû à l'étalement du faisceau d'émission, qui augmente avec la distance (dB)
- A_{atmo} : affaiblissement atmosphérique dû à l'absorption et à la diffusion (dB)
- $A_{scintillation}$: affaiblissement dû à la turbulence atmosphérique (dB)
- $A_{système}$: intègre l'ensemble des autres affaiblissemments dépendant du système (dB): affaiblissement dû au dépointage, pertes optiques au niveau du récepteur, affaiblissement dû au mouvement aléatoire du faisceau, affaiblissement dû à la lumière ambiante (rayonnement solaire), etc.

La définition et le calcul de ces termes ainsi que les études préalables à la planification d'une liaison FSO sont indiqués ci-après.

Pour qu'un système FSO fonctionne correctement, il importe de bien choisir la position de la liaison. Il convient, pour assurer une qualité de fonctionnement optimale de la liaison, de tenir compte lors de

l'installation des liaisons FSO des conditions météorologiques dominantes, des obstacles physiques et de la nature des surfaces le long du trajet, ainsi que des différents montages de l'émetteur-récepteur.

Météorologie

- Les conditions météorologiques, notamment la climatologie locale, dans le voisinage du trajet choisi pour la liaison influent sur la probabilité d'apparition de neige, de pluie, de bruine, de brouillard, de brume, d'aérosols et de poussière/sable, qui provoquent une absorption et une diffusion du signal émis.

Caractéristiques du trajet

- Il convient, de toute évidence, d'éviter les obstacles physiques le long du trajet entre l'émetteur et le récepteur. À cet égard, il ne faut pas oublier que les arbres matures peuvent croître en hauteur de 0,5 à 1 m par an et que leur densité de feuillage varie pendant l'année.
- Les liaisons installées entre des bâtiments doivent tenir contre des cheminées thermiques, qui peuvent produire une montée d'air chaud à travers le trajet de la liaison; la turbulence qui en résulte peut en effet entraîner d'importants niveaux de scintillation au niveau du récepteur.
- La topographie et la nature de la surface qui se trouve au-dessous du trajet FSO à visibilité directe peuvent avoir une incidence importante sur la qualité de fonctionnement de la liaison. Ainsi, les liaisons installées au-dessus de vallées fluviales ou de zones maritimes ouvertes enregistrent plus souvent des épisodes de brouillard. En outre, les constructions qui se trouvent sous la liaison peuvent produire une activité thermique supplémentaire dans l'air au-dessus d'elles, qui se traduit par une scintillation accrue dans le signal reçu.

Montage de l'émetteur-récepteur

- La plupart des systèmes FSO ayant une largeur de faisceau très étroite, il est essentiel que les émetteurs-récepteurs soient montés avec précision. Toute erreur d'alignement entraîne en effet un affaiblissement important du signal. Pour assurer la stabilité nécessaire, il est essentiel de prévoir un montage direct sur des murs épais ou au sommet d'un pylône unique afin de garantir un fonctionnement fiable sur une période de temps. Il convient de réduire au minimum les mouvements dus à des différences d'expansion thermique ou à des secousses provoquées par le vent.

3 Affaiblissement géométrique

Même par temps clair, le faisceau diverge et le détecteur reçoit une puissance moindre. L'affaiblissement dû à l'étalement du faisceau à mesure que la distance augmente est appelé affaiblissement géométrique. Il est donné par l'équation (196):

$$A_{géo} \text{ (dB)} = 10 \log_{10} \left(\frac{S_d}{S_{capture}} \right) = 10 \log_{10} \left(\frac{\frac{\pi}{4} (d \theta)^2}{S_{capture}} \right) \quad (196)$$

où:

- S_d : surface du faisceau émis à la distance d
- $S_{capture}$: surface de capture du récepteur (m^2)
- θ : divergence du faisceau (mrad)
- d : distance émetteur-récepteur (km).

4 Affaiblissement atmosphérique dû à l'absorption et à la diffusion

Les liaisons optiques en espace libre (FSO) sont dégradées par l'absorption et la diffusion de lumière par l'atmosphère terrestre. L'atmosphère interagit en effet avec la lumière du fait de sa composition, faite

normalement de différentes substances moléculaires, de petites particules en suspension (aérosols, brouillard) et de particules de précipitation (pluie, neige et grêle).

L'affaiblissement de la puissance du laser est décrit par la loi de Beers [Weichel, 1990]:

$$\tau(\lambda, d) = \frac{P(\lambda, d)}{P(\lambda, 0)} = \exp\{-\gamma(\lambda) \cdot d\} \quad (197)$$

où:

- $\tau(\lambda, d)$: transmittance à la distance d pour la longueur d'onde λ
- $P(\lambda, d)$: puissance du laser à la distance d
- $P(\lambda, 0)$: puissance du laser à la source
- $\gamma(\lambda)$: affaiblissement ou coefficient d'extinction par unité de longueur.

Le coefficient d'extinction se compose de deux parties:

$$\gamma(\lambda) = A_a + S_a \quad (198)$$

où A_a désigne le coefficient d'absorption (A_a représente la somme de tous les coefficients d'absorption potentielle, à savoir l'absorption moléculaire et l'absorption par les aérosols) et S_a désigne le coefficient de diffusion (S_a représente la somme de tous les coefficients de diffusion potentielle, notamment la diffusion moléculaire, la diffusion par les aérosols et la diffusion par le brouillard).

L'affaiblissement atmosphérique A_{atmo} peut s'exprimer comme la somme de deux termes:

$$A_{atmo} = A_{temps_clair} + A_{suppl} \quad (199)$$

où:

- A_{temps_clair} : affaiblissement par temps clair (dû à la présence de molécules gazeuses)
- A_{suppl} : affaiblissement dû à la présence occasionnelle de brouillard, de brume, de brume sèche, de bruine, de pluie, de neige ou de grêle.

L'atmosphère étant un médium de transmission qui varie avec le temps, A_{atmo} est un processus stochastique. Cela étant, le fait de fixer les limites de disponibilité du système et les effets qui résultent de ces contraintes sont généralement modélisés selon des principes statistiques. La marge de liaison, $M_{liaison}$, représente la quantité d'affaiblissement acceptable pour un système donné à une distance donnée.

4.1 Affaiblissement par temps clair

L'affaiblissement par temps clair est essentiellement dû à l'absorption par les molécules gazeuses. L'absorption des rayonnements qui se propagent dans l'atmosphère à des longueurs d'onde optiques spécifiques résulte de l'interaction entre les photons et des atomes ou molécules (N_2 , O_2 , H_2 , H_2O , CO_2 , O_3 , etc.), qui entraîne l'extinction des photons incidents et une élévation de la température. Le coefficient d'absorption dépend du type et de la concentration des molécules de gaz.

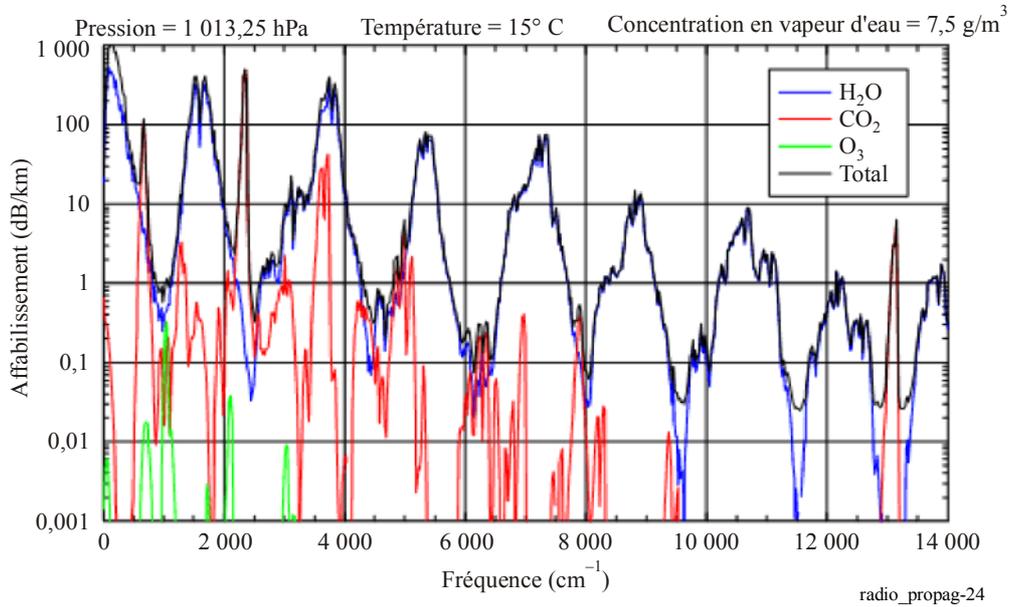
L'absorption moléculaire est un phénomène sélectif, qui se traduit par une transmission atmosphérique spectrale. Cette transmission présente des zones transparentes, appelées fenêtres de transmission atmosphérique, et des zones opaques, appelées fenêtres de blocage atmosphérique [Bouchet et al., 2005 et Andrews et Phillips, 2005]. Les principales molécules atmosphériques présentant une forte absorption dans la bande IR sont l'eau, CO_2 , l'ozone et O_3 . La Fig. 24 illustre l'affaiblissement linéique, calculé par le logiciel LOWTRAN 7, dû aux gaz atmosphériques dans la gamme de fréquences (nombre d'onde, $1/\lambda$) comprise entre 600 GHz et 420 THz (20 et 14 000 cm^{-1}) [Gibbins, 1999]. L'affaiblissement par diffusion dû aux molécules gazeuses est négligeable, car la taille de ces molécules est très inférieure à la longueur d'onde [Pratt, 1969].

En règle générale, les longueurs d'onde laser sont choisies de façon à tomber dans les fenêtres de transmission atmosphérique. Ainsi, A_{temps_clair} est négligeable [Weichel, 1990]. Les longueurs d'onde

habituellement utilisées sur les liaisons FSO sont proches de 690, 780, 850, et 1 550 nm. Cela étant, les systèmes opérant dans des zones à forte densité urbaine, et donc à forte densité d'aérosols, tirent parfois un léger bénéfice de longueurs d'onde différentes de celles utilisées dans les zones suburbaines relativement peu polluées.

FIGURE 24

Affaiblissement par les gaz aux longueurs d'onde infrarouges



4.2 Affaiblissement supplémentaire

On appelle affaiblissement supplémentaire l'affaiblissement dû à la présence occasionnelle de particules de brouillard, de brume, de brume sèche, de bruine, de neige et de pluie. La présence de ces particules entraîne une redistribution angulaire des flux incidents, appelée diffusion, et provoque une diminution de la propagation du flux dans la direction d'origine. Contrairement à l'absorption, ce phénomène n'entraîne pas de perte d'énergie. La taille des particules de diffusion par rapport à la longueur d'onde laser d'émission détermine le type de diffusion. Le Tableau 7 présente les trois régimes de diffusion en fonction de la taille des particules ainsi qu'une relation approchée entre la longueur d'onde et le coefficient d'affaiblissement par diffusion (section équivalente). Ce tableau présente également le type de particule correspondant à chaque régime pour les longueurs d'onde visibles et infrarouges [Kim et al., 2000; McCartney, 1976 et Wallace et Hobbs, 1977].

TABLEAU 7

Régimes de diffusion en fonction de la taille des particules r par rapport à la longueur d'onde λ et relation approchée entre la longueur d'onde et le coefficient d'affaiblissement par diffusion $Q(\lambda)$

	Diffusion de Rayleigh	Diffusion de Mie	Diffusion non sélective ou géométrique
	$r \ll \lambda$ $Q(\lambda) \sim \lambda^{-4}$	$r \approx \lambda$ $Q(\lambda) \sim \lambda^{-1,6}$ a $Q(\lambda) \sim \lambda^0$	$r \gg \lambda$ $Q(\lambda) \sim \lambda^0$
Type de particule	molécules d'air brume sèche	brume sèche brouillard aérosols	brouillard pluie neige grêle

Dans le régime de Rayleigh, en raison de la relation $Q(\lambda) \sim \lambda^{-4}$, la contribution de la diffusion par les molécules d'air au coefficient d'affaiblissement global est négligeable [Pratt, 1969].

La diffusion due aux particules dont la taille est très supérieure à la longueur d'onde laser peut être décrite par l'optique géométrique et ne dépend pas de la longueur d'onde. Ainsi, les gouttes de pluie, la neige, la grêle, les gouttelettes de nuage et le brouillard épais diffusent la lumière laser de façon géométrique [Wallace et Hobbs, 1977].

En ce qui concerne les particules dont la taille est comparable à la longueur d'onde, on peut appliquer le régime de diffusion de Mie. Cette théorie, quoique complexe, est bien comprise. Les particules de brouillard et les aérosols sont les principaux contributeurs au processus de diffusion de Mie.

Il est possible de recourir à une approche analytique consistant à prévoir, par le calcul, les valeurs de $\gamma(\lambda)$ à partir des sections équivalentes des particules atmosphériques obtenues de façon théorique, en prenant l'hypothèse de certaines distributions en taille de particules. Cela étant, ces distributions (aérosols ou brouillard), paramètres essentiels pour déterminer leurs propriétés physiques et optiques, ne sont pas faciles à modéliser ni même à mesurer.

4.2.1 Diffusion de Mie (estimation de l'affaiblissement par le brouillard)

Étant donné qu'il n'est souvent pas très pratique d'utiliser une approche analytique pour calculer l'affaiblissement dû à la diffusion de Mie, les spécialistes de la FSO ont adopté des méthodes empiriques. Dans ces méthodes, le coefficient d'affaiblissement dû à la diffusion de Mie est donné en fonction de la visibilité.

D'un point de vue technique, la visibilité ou portée visuelle est définie par la distance que la lumière doit parcourir pour que son intensité chute à 2% de sa puissance initiale. D'un point de vue qualitatif, la visibilité désigne la distance à laquelle il est tout juste possible de distinguer un objet sombre par rapport à l'horizon [Middleton, 1952]. On peut facilement mesurer le paramètre de visibilité et le stocker dans une base de données, au niveau d'une station météorologique ou dans un aéroport. Il est ainsi possible d'évaluer la qualité de fonctionnement géolocale de ces systèmes de télécommunications à partir de la distribution de ce paramètre. Il convient toutefois de souligner que les données de visibilité collectées dans les aéroports ne correspondent pas nécessairement aux conditions qui prévalent dans les environnements urbains ou dans les environnements ruraux, lesquelles peuvent être très différentes en termes de topographie et de proximité des zones aquatiques.

On trouve dans [Weichel, 1990] une équation empirique simplifiée, que les spécialistes de la FSO utilisent depuis longtemps pour calculer le coefficient d'affaiblissement dû au brouillard, $\gamma_{brouillard}(\lambda)$ (dB/km):

$$\gamma_{brouillard}(\lambda) = \frac{3,91}{V} \left(\frac{\lambda}{550 \text{ nm}} \right)^{-q} \quad (200)$$

où:

V : visibilité (km)

λ : longueur d'onde (nm)

q : coefficient qui dépend de la distribution en taille des particules de diffusion.

Cette équation, déterminée à partir de données expérimentales [Kim, 1997; Middleton, 1952], fait toujours l'objet de travaux pratiques. Weichel [1990] et Pratt [1969] la donnent sous la forme suivante:

$$\begin{aligned} q &= 1,6 && \text{si} && V > 50 \text{ km} \\ &= 1,3 && \text{si} && 6 \text{ km} < V < 50 \text{ km} \\ &= 0,585V^{1/3} && \text{si} && V < 6 \text{ km} \end{aligned} \quad (201)$$

Pour obtenir la valeur d'affaiblissement dépassée pendant un pourcentage de temps donné p (c'est-à-dire pour une certaine probabilité), il est nécessaire, d'après l'équation (205), de déterminer la valeur de visibilité non dépassée pendant ce pourcentage p . À noter que les améliorations du calcul d'affaiblissement dû au brouillard récemment proposées font toujours l'objet de travaux expérimentaux [Al Naboulsi et al, 2004 et Kim et al., 2000]. Le Tableau 8 présente le code international de visibilité, qui met en corrélation des conditions météorologiques et la visibilité [Chu et Hogg, 1968 et McCartney, 1976].

TABLEAU 8
Code international de visibilité: visibilité en fonction des conditions météorologiques [McCartney, 1976] et des précipitations [Chu et Hogg, 1968]

Conditions météorologiques	Précipitations		Visibilité		
		mm/hr			
Brouillard dense			0 m		
			50 m		
Brouillard épais			200 m		
			500 m		
Brouillard léger	Neige - - - - - -	Averse torrentielle	100	770 m	
				1 km	
Mince couche de brouillard		Forte pluie	25	1,9 km	
				2 km	
Brume sèche		Pluie modérée	12,5	2,8 km	
				4 km	
Brume légère		Pluie légère	2,5	5,9 km	
				10 km	
Clair			Bruine	0,25	18,1 km
				20 km	
Très clair			23 km		
			50 km		

4.2.2 Affaiblissement dû à la pluie

L'affaiblissement linéique dû à la pluie (dB/km) est en général donné par la relation suivante [Carbonneau et Wisely, 1998; Hiromoto, 1997 et Akiba *et al.*, 2004]:

$$\gamma_{pluie} = k \cdot R^\alpha \tag{202}$$

On a observé que les paramètres α et k dépendent de l'emplacement. Le Tableau 9 en fournit quelques mesures:

TABLEAU 9

Paramètres utilisés pour estimer l'affaiblissement linéique dû à la pluie

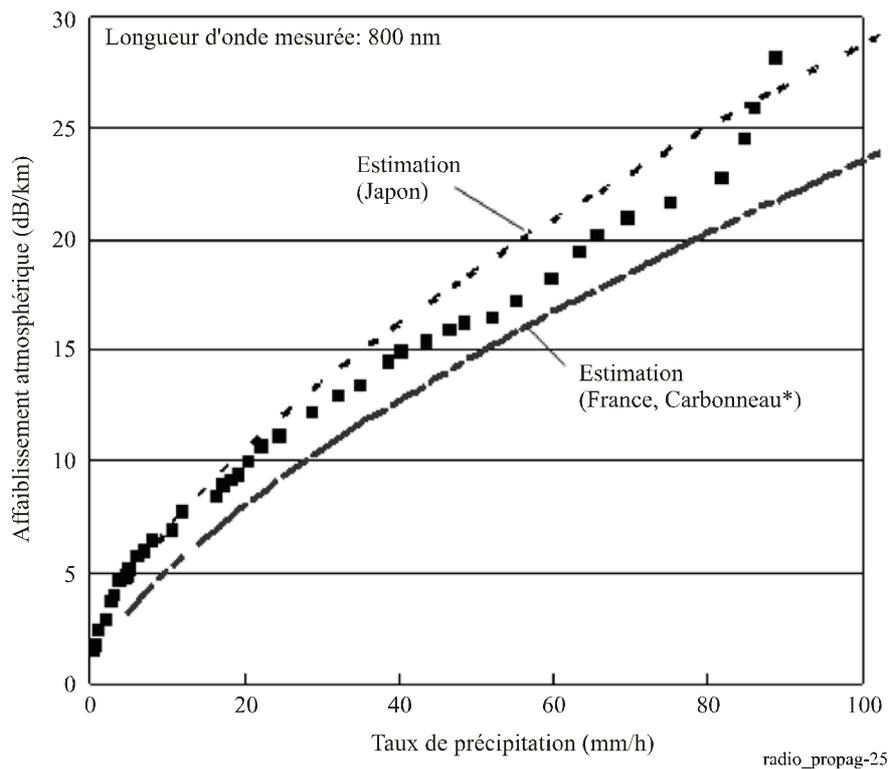
Lieu	k	α
Japon	1,58	0,63
France	1,076	0,67

La Recommandation UIT-R P.837 fournit, pour toute localisation, le taux de précipitation, $R(p)$ (mm/h), dépassé pendant un pourcentage de temps donné de l'année en moyenne, p . L'équation (206) donne la valeur du niveau d'affaiblissement linéique dépassé pendant le pourcentage de temps p .

La Fig. 25 illustre la relation entre γ_{pluie} et le taux de précipitation R , à partir des paramètres du Tableau 7, pour des données mesurées au Japon.

FIGURE 25

Affaiblissement atmosphérique dû à la pluie



4.2.3 Affaiblissement dû à la neige

L'affaiblissement en fonction du taux de chute de neige est donné par la formule suivante:

$$\gamma_{neige} = a \cdot S^b \quad (203)$$

où:

- γ_{neige} : affaiblissement linéique (dB/km) dû à la neige
- S : taux de chute de neige (mm/h)

a et b : paramètres dépendant de la longueur d'onde, donnés par la relation suivante en fonction de la longueur d'onde λ (nm).

TABLEAU 10

Paramètres utilisés pour estimer l'affaiblissement linéique dû à la neige

	a	b
Neige humide	$0,0001023\lambda + 3,7855466$	0,72
Neige sèche	$0,0000542\lambda + 5,4958776$	1,38

5 Effets de scintillation

Second phénomène atmosphérique majeur qui dégrade la qualité de fonctionnement des systèmes de communication par laser: la scintillation atmosphérique due à la turbulence, qui entraîne de graves fluctuations de la puissance du signal reçu.

La turbulence atmosphérique produit des poches d'air temporaires, caractérisées par des températures légèrement différentes, des densités différentes, et donc des indices de réfraction différents par rapport au milieu ambiant. En se propageant à travers ces hétérogénéités de l'indice de réfraction, le faisceau laser se déforme. Les mouvements aléatoires du faisceau et la scintillation qui en résulte peuvent entraîner des pertes de données. L'importance de chacun de ces effets dépend de la taille des cellules de turbulence par rapport au diamètre du faisceau laser.

Si la taille des cellules de turbulence est supérieure au diamètre du faisceau laser, l'ensemble du faisceau se courbe aléatoirement. Lorsque le faisceau s'écarte complètement de l'ouverture du récepteur, le signal est perdu [Weichel, 1990 et Kim et al., 1998]. À noter que les mouvements aléatoires du faisceau sont d'autant plus grands que la longueur d'onde est courte, bien que cette dépendance avec la longueur d'onde soit faible. Si le maintien de la direction d'un faisceau étroit peut se révéler problématique, il convient de noter que la vitesse de fluctuation est faible (inférieure à un ou deux kHz), de sorte que l'utilisation d'un système de suivi est envisageable.

Plus couramment, si la taille des cellules de turbulence est inférieure au diamètre du rayon laser, la courbure et la diffraction du rayon produisent des distorsions dans la surface d'onde du faisceau [Weichel, 1990]. Ce phénomène entraîne des fluctuations temporelles, appelées scintillations, dans l'intensité du faisceau laser au niveau du récepteur, dont la fréquence est comprise entre 0,01 Hz et 200 Hz.

L'effet de la scintillation troposphérique est généralement étudié à partir du logarithme de l'amplitude χ (dB) du signal observé («log-amplitude»), défini comme étant le rapport en décibels de son amplitude instantanée à sa valeur moyenne. L'intensité et la vitesse des fluctuations (fréquence des scintillations) augmentent avec la fréquence de l'onde. Pour une onde plane, une turbulence faible et un récepteur ponctuel, la variance de scintillation σ_x^2 (dB²) peut être exprimée par la relation suivante:

$$\sigma_x^2 = 23,17 \cdot k^{7/6} \cdot C_n^2 \cdot L^{11/6} \quad (204)$$

où:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} : \text{nombre d'onde (m}^{-1}\text{)}$$

L : longueur de la liaison (m)

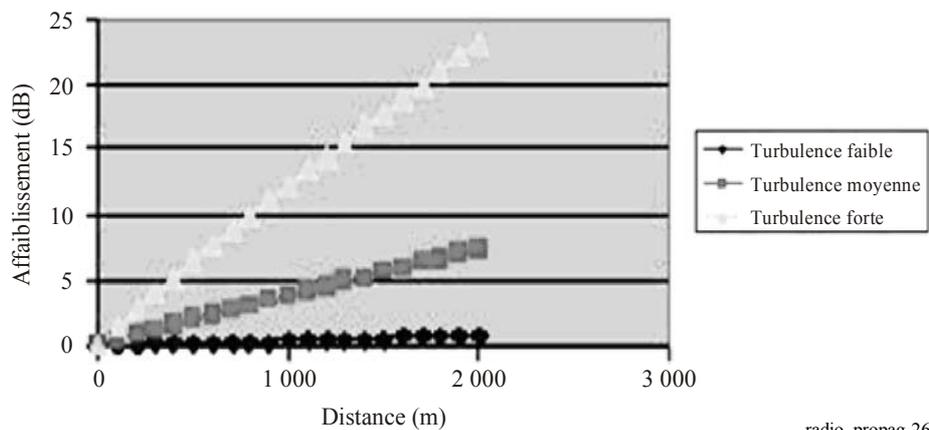
C_n^2 : paramètre de structure de l'indice de réfraction (m^{-2/3}).

L'amplitude crête à crête de scintillation est égale à $4\sigma_x$ et l'affaiblissement lié à la scintillation est égal à $2\sigma_x$. Pour de fortes turbulences, on observe une saturation de la variance donnée par la relation ci-dessus [Bataille, 1992]. On notera que le paramètre de C_n^2 n'a pas la même valeur aux ondes millimétriques et

optiques [Vasseur *et al.*, 1997]. Les ondes millimétriques sont particulièrement sensibles aux fluctuations d'humidité tandis qu'en optique, la scintillation est principalement une fonction de la température. On obtient, en ondes millimétriques, une valeur de C_n^2 d'environ $10^{-13} \text{ m}^{-2/3}$, ce qui correspond à une turbulence moyenne (en général, dans le millimétrique, $10^{-14} < C_n^2 < 10^{-12}$) et, en ondes optiques, une valeur de C_n^2 d'environ $2 \times 10^{-15} \text{ m}^{-2/3}$, ce qui correspond à une turbulence légère (en général, en optique, $10^{-16} < C_n^2 < 10^{-13}$) [Bataille, 1992].

La Fig. 26 indique la variation de l'affaiblissement d'un faisceau optique de longueur d'onde $1,55 \mu\text{m}$, pour différents types de turbulence à des distances allant jusqu'à 2 000 m. Il apparaît clairement que l'affaiblissement croît quand la turbulence augmente. Le Tableau 11 récapitule les effets de la turbulence sur la propagation des ondes optiques et radioélectriques. On notera que la scintillation a incontestablement des effets plus importants sur les faisceaux optiques de courte longueur d'onde.

FIGURE 26
Variation de l'affaiblissement dû à la scintillation en fonction de la distance pour différents types de turbulence à $1,55 \mu\text{m}$



radio_propag-26

TABLEAU 11
Synthèse de l'affaiblissement dû à la scintillation

	Turbulence		
	Faible	Modérée	Élevée
C_n^2 ondes optiques ($\text{m}^{-2/3}$)	10^{-16}	10^{-14}	10^{-13}
Affaiblissement ($0,98 \mu\text{m}$) (dB)	0,51	5,06	16,00
Affaiblissement ($1,55 \mu\text{m}$) (dB)	0,39	3,87	12,25
C_n^2 ondes millimétriques ($\text{m}^{-2/3}$)	10^{-15}	10^{-13}	10^{-12}
Affaiblissement (40 GHz) (dB)	0,03	0,09	0,27
Affaiblissement (60 GHz) (dB)	0,03	0,11	0,35

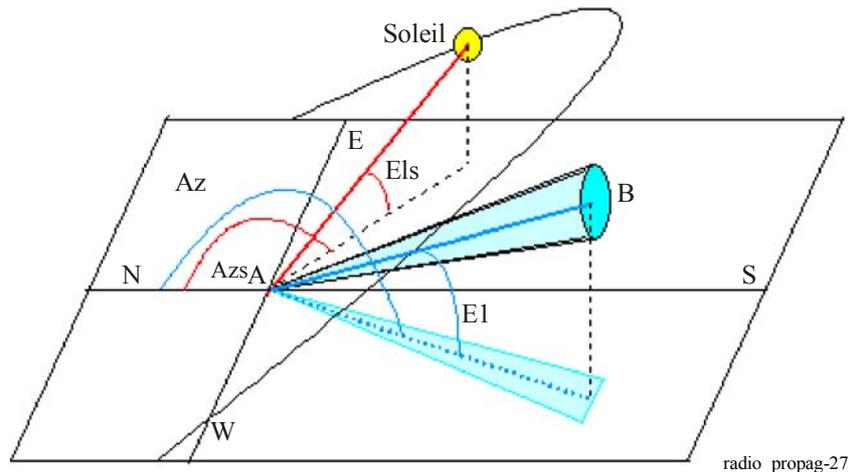
Les fluctuations dues à la scintillation peuvent être réduites au moyen soit de faisceaux multiples soit de larges ouvertures de réception [Churnside, 1991 et Kim et al., 1997]. De plus, pour réduire au minimum les effets de la scintillation sur le trajet de transmission, les liaisons FSO ne doivent pas être installées à proximité de surfaces chaudes. Étant donné que la scintillation décroît lorsque l'altitude augmente, il est recommandé d'installer les liaisons FSO à une hauteur légèrement supérieure au sommet des bâtiments (> 1 m), et loin d'un mur latéral dans le cas d'une installation dans un environnement qui s'apparente au climat désertique.

6 Affaiblissement dû à la lumière ambiante

On dit qu'une conjonction solaire a lieu lorsque le soleil ou une image réfléchie du soleil se situe dans le champ de vision instantané (IFOV) d'un récepteur optique ou à proximité de ce champ. L'IFOV du récepteur est en général au moins aussi grand que l'angle de divergence de l'émetteur. Le problème devient critique lorsque la position du soleil est parallèle à la liaison optique et que la puissance solaire pénétrant dans le récepteur est supérieure à la puissance reçue de l'émetteur.

En règle générale, on diminue les brouillages dus au soleil en positionnant le récepteur de sorte que le soleil soit toujours hors axe. La Fig. 27 illustre la configuration géométrique de la course du soleil dans le ciel par rapport à une liaison optique en espace libre (le point A étant le récepteur et le point B l'émetteur).

FIGURE 27
Schéma de la course du Soleil par rapport à une liaison optique en espace libre



La puissance rayonnée par le soleil $P_{rayonnée}$ (W/m^2) est définie par la relation suivante:

$$P_{rayonnée} = 1200 \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - E_{ls}\right) \quad (205)$$

où E_{ls} est l'élévation du soleil (rad).

La puissance reçue est donnée par:

$$P_{solaire} = F_{solaire} \cdot P_{rayonnée} \cdot S_{capture} \cdot B_{récepteur} / 100 \quad (206)$$

où:

- $F_{solaire}$: fonction de la longueur d'onde qui caractérise la puissance spectrale du soleil
- $S_{capture}$: surface de capture du récepteur (m^2)
- $B_{récepteur}$: largeur de bande du récepteur (nm)

$F_{solaire}$: paramètre défini par la relation suivante:

$$\begin{aligned}
 F_{solaire} = & 8,97162055148876 \times 10^{-13} \lambda^5 - 4,64912739129745 \times 10^{-9} \lambda^4 \\
 & + 9,37072684333339 \times 10^{-6} \lambda^3 - 9,066632383289905 \times 10^{-3} \lambda^2 \\
 & + 4,05479801934347 \lambda - 5,70237282654237
 \end{aligned} \quad (207)$$

où λ désigne la longueur d'onde (nm).

7 Observations diverses

Autres facteurs à prendre en compte lors de la conception d'une liaison FSO:

- Des règles de sécurité internationales limitent strictement la puissance de sortie maximale des systèmes optiques. Les normes de sécurité oculaire des agences de réglementation autorisent l'utilisation des lasers à 1 550 nm avec des puissances environ 100 fois plus élevées que celles des lasers fonctionnant à des longueurs d'onde plus petites. Principal inconvénient de ce type de laser, son coût plus élevé que les systèmes fonctionnant autour de 850 nm.
- On peut installer les émetteurs-récepteurs FSO derrière des fenêtres. À noter cependant que l'angle entre le faisceau et la fenêtre est un paramètre critique: le faisceau doit être aussi perpendiculaire que possible, tout en ménageant cependant un petit angle (5°) afin de réduire les rebonds du faisceau vers le récepteur. Il faut également tenir compte du fait que certaines fenêtres contiennent du verre ou un revêtement destiné à réduire les reflets. Ces fenêtres étant souvent conçues pour bloquer les rayons infrarouges, leur revêtement peut diminuer le signal de 60%, voire plus.
- Une faible visibilité diminue l'efficacité et la disponibilité des liaisons FSO. Elle peut apparaître à une période spécifique du jour ou de l'année ou être causée par un phénomène local (brouillards côtiers). Une solution pour contrer les effets négatifs de la faible visibilité consiste à raccourcir la distance entre les extrémités de façon à augmenter la marge de liaison et, partant, à mieux gérer les mauvaises conditions météorologiques.

8 Exemple d'application

Pour calculer la marge de liaison des systèmes présentant les caractéristiques suivantes, on applique la procédure conseillée dans la Recommandation UIT-R P.1814:

Paramètres système		
Système A	Système B	Système C
Longueur d'onde, $\lambda = 850$ nm	Longueur d'onde, $\lambda = 850$ nm	Longueur d'onde, $\lambda = 850$ nm
Puissance totale de sortie, $P_e = 100$ mW	Puissance totale de sortie, $P_e = 100$ mW	Puissance totale de sortie, $P_e = 100$ mW
Sensibilité du récepteur, $S_r = -46$ dBm	Sensibilité du récepteur, $S_r = -46$ dBm	Sensibilité du récepteur, $S_r = -46$ dBm
Surface de capture du récepteur, $S_{capture} = 0.005$ m ²	Surface de capture du récepteur, $S_{capture} = 0.005$ m ²	Surface de capture du récepteur, $S_{capture} = 0.005$ m ²
Divergence du faisceau, $\theta = 2$ mrad	Divergence du faisceau, $\theta = 2$ mrad	Divergence du faisceau, $\theta = 2$ mrad
Affaiblissement du système, $A_{système} = 3$ dB	Affaiblissement du système, $A_{système} = 3$ dB	Affaiblissement du système, $A_{système} = 3$ dB
Lieu: France	Lieu: France	Lieu: France
Longueur du trajet, $d = 500$ m	Longueur du trajet, $d = 1\,000$ m	Longueur du trajet, $d = 1\,000$ m

Par temps clair:

$$M_{liaison} = P_e - S_r - A_{système} - A_{géo} - \gamma_{temps_clair} \cdot d^*$$

Paramètres système		
Système A	Système B	Système C
Affaiblissement géométrique $A_{géo} = 21,96$ dB	Affaiblissement géométrique $A_{géo} = 27,98$ dB	Affaiblissement géométrique $A_{géo} = 40,02$ dB
$M_{liaison} = 41,04$ dBm	$M_{liaison} = 35,02$ dBm	$M_{liaison} = 22,98$ dBm

* L'affaiblissement linéique par temps clair peut-être négligé.

Par temps de brouillard:

$$M_{liaison} = P_e - S_r - A_{système} - A_{géo} - \gamma_{temps_clair} \cdot d - \gamma_{brouillard} \cdot d$$

Visibilité V = 200 m

Paramètres système		
Système A	Système B	Système C
$M_{liaison} = 32,61$ dBm	$M_{liaison} = 18,15$ dBm	$M_{liaison} = -44,49$ dBm

Visibilité V = 1 000 m

$M_{liaison} = 39,52$ dBm	$M_{liaison} = 31,98$ dBm	$M_{liaison} = 10,83$ dBm
---------------------------	---------------------------	---------------------------

Par temps de pluie légère (taux de précipitation R = 2,5 mm/h):

$$M_{liaison} = P_e - S_r - A_{système} - A_{géo} - \gamma_{temps_clair} \cdot d - \gamma_{pluie} \cdot d$$

Paramètres système		
Système A	Système B	Système C
$M_{liaison} = 40,05$ dBm	$M_{liaison} = 33,03$ dBm	$M_{liaison} = 15,02$ dBm

Par temps de forte pluie (taux de précipitation R = 25 mm/h):

$$M_{liaison} = P_e - S_r - A_{système} - A_{géo} - \gamma_{temps_clair} \cdot d - \gamma_{pluie} \cdot d$$

Paramètres système		
Système A	Système B	Système C
$M_{liaison} = 36,39$ dBm	$M_{liaison} = 25,72$ dBm	$M_{liaison} = -14,22$ dBm

Références

- AKIBA, M., WAKAMORI, K. et ITO, S. [2004] Measurement of optical propagation characteristics for free-space optical communication during rainfall. *IEICE Trans. Comm.*, Vol. E87-B, 7, p. 2053-2056.
- AL NABOULSI, M., SIZUN, H. et DE FORNEL, F. [2004] Fog attenuation prediction for optical and infrared waves. *Opt. Eng.*, Vol. 43, 2, p. 319-329.
- ANDREWS, L. C. et PHILLIPS, R. L. [2005] *Laser Beam Propagation through Random Media*. SPIE, Bellingham, Washington, États-Unis d'Amérique.
- BATAILLE, P. [1992] Analyse du comportement d'un système de télécommunications optique fonctionnant à 0,83 μm dans la basse atmosphère. Thèse de doctorat, Université de Rennes, France.
- BOUCHET, O., SIZUN, H., BOISROBERT, C., DE FORNEL, F. et FAVENNEC, P. N. [2005] *Free-Space Optics: Propagation and Communication*. Hermes, p. 214. ISBN: 978-1-905209-02-6 / 1-905209-02-9.
- CARBONNEAU, T. H. et WISELY, D. R. [1998] Opportunities and challenges for optical wireless; the competitive advantage of free space telecommunications links in today's crowded market place. SPIE Conference on optical wireless communications, Vol. 3232, Boston, Massachusetts, États-Unis d'Amérique.
- CHU, T. S. et HOGG, D. C. [1968] Effects of precipitation on propagation at 0.63, 3.5 and 10.6 microns. *BSTJ*, Vol. 47, p. 723-759.
- CHURNSIDE, J. H. [1991] Aperture averaging of optical scintillations in the turbulent atmosphere. *Appl. Opt.*, 30, p. 1982-1994.
- GIBBINS, C. J. [1999] Propagation in the millimetric, submillimetric and infrared wavelength regions. A study for RACAL research. CCLRC RCRU-Rutherford Appleton Laboratory.
- HIROMOTO, N. [1997] Novel detector technologies for infrared communication and sensing. CRC International Topic Workshop on Space Laser Communication- Current Status and Future Perspectives, p. 90-95.
- KIM, I. I. *et al.* [1997] Measurement of scintillation and link margin for the TerraLinkTM laser communication system. *Wireless Technologies and Systems: Millimeter Wave and Optical*. Proc. SPIE, 3232, p. 100-118.
- KIM, I. I., McARTHUR, B. et KOREVAAR, E. [2000] Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications. *Optical Wireless Communications III*. Proc. SPIE, 4214, p. 26-37.
- McCARTNEY, E. J. [1976] *Optics of the Atmosphere*. J. Wiley & Sons, New York, États-Unis d'Amérique.
- MIDDLETON, W. E. K. [1952] *Vision Through the Atmosphere*. University of Toronto Press.
- ONTAR [1999] *Fascode Atmospheric code: PcLn/Fascod 3P*. Published by ONTAR Corporation, North Andover, Massachusetts, États-Unis d'Amérique.
- PRATT, W. K. [1969] *Laser Communications Systems*. J. Wiley & Sons, New York, États-Unis d'Amérique.
- VASSEUR H. V., OESTGES, C. et VANDER VORST, A. [1997] Influence de la troposphère sur les liaisons sans fil aux ondes millimétriques et optiques. Propagation électromagnétique du décimétrique à l'angström, 3ièmes journées, Rennes, France.
- WALLACE, J. M. et HOBBS, P. V. [1977] *Atmospheric Science: An Introductory Survey*. Academic Press, Orlando, États-Unis d'Amérique.
- WEICHEL, H. [1990] *Laser Beam Propagation in the Atmosphere*. SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, WA, États-Unis d'Amérique.
-



Imprimé en Suisse
Genève, 2009
ISBN 92-61-12772-X
Crédits photos: Shutterstock