

## RECOMMANDATION UIT-R P.530-7

**DONNÉES DE PROPAGATION ET MÉTHODES DE PRÉVISION NÉCESSAIRES POUR LA CONCEPTION DE FAISCEAUX HERTZIENS À VISIBILITÉ DIRECTE DE TERRE**

(Question UIT-R 204/3)

(1978-1982-1986-1990-1992-1994-1995-1997)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

*considérant*

- a) que, pour planifier convenablement les faisceaux hertziens à visibilité directe de Terre, il est nécessaire que l'on dispose de méthodes de prévision et de données appropriées en matière de propagation;
- b) que l'on a mis au point des méthodes qui permettent de prévoir certains des paramètres de propagation les plus importants qui affectent la planification des faisceaux hertziens à visibilité directe de Terre;
- c) que, dans toute la mesure possible, ces méthodes ont été testées par rapport aux données mesurées disponibles et qu'elles se sont révélées être d'une précision à la fois compatible avec la variabilité naturelle des phénomènes de propagation et adéquate pour la plupart des applications actuelles en matière de planification de systèmes,

*recommande*

**1** que, dans les gammes de paramètres respectivement indiquées, les méthodes de prévision et autres techniques exposées dans l'Annexe 1 soient adoptées pour la planification des faisceaux hertziens en visibilité directe de Terre.

## ANNEXE 1

**1 Introduction**

Dans la réalisation des faisceaux hertziens à visibilité directe, on doit tenir compte de plusieurs effets de propagation, parmi lesquels:

- les évanouissements par diffraction dus au fait que des obstacles de terrain obstruent le trajet dans des conditions défavorables de propagation;
- l'affaiblissement dû aux gaz de l'atmosphère;
- les évanouissements dus à la propagation par trajets multiples dans l'atmosphère ou à l'étalement du faisceau (généralement appelé «defocusing») associé à la présence de couches de réfraction anormales;
- les évanouissements dus à la propagation par trajets multiples provenant de réflexions sur la surface de la Terre;
- l'affaiblissement dû aux précipitations ou à la présence de particules solides dans l'atmosphère;
- la variation, due à la réfraction, de l'angle d'arrivée au terminal de réception et de l'angle de départ au terminal d'émission;
- la réduction du découplage de polarisation croisée dans les conditions de propagation par trajets multiples ou de précipitation;
- la distorsion du signal due aux évanouissements sélectifs et au retard de propagation dans les conditions de propagation par trajets multiples.

La présente Annexe a notamment pour but d'exposer sous forme concise et pas à pas des méthodes simples de prévision des phénomènes de propagation qu'il faut prendre en compte pour la majorité des liaisons fixes à visibilité directe ainsi que des renseignements sur leur domaine de validité. Cette Annexe a pour autre objectif de présenter d'autres informations et techniques qu'il est possible de recommander en vue de la planification des faisceaux hertziens à visibilité directe de Terre.

On peut estimer que d'autres méthodes, fondées sur des climats ou conditions topographiques spécifiques dans le territoire d'une administration, présentent des avantages sur celles qui sont incluses dans la présente Annexe.

A part les questions de brouillage dû à la réduction du découplage de polarisation croisée, cette Annexe se limite aux effets affectant le signal utile. Une certaine tolérance globale est définie au § 2.3.5 afin de tenir compte des effets du brouillage intrasystème dans les systèmes numériques, mais le sujet n'est pas traité plus avant. D'autres aspects relatifs au brouillage sont traités dans d'autres Recommandations, notamment:

- les brouillages intersystèmes impliquant d'autres liaisons de Terre ou des stations terriennes dans la Recommandation UIT-R P.452;
- les brouillages intersystèmes impliquant des stations spatiales dans la Recommandation UIT-R P.619.

Afin d'optimiser l'utilité de la présente Annexe pour la conception et la planification des systèmes, l'information a été organisée en fonction des effets de propagation à prendre en considération, plutôt qu'en fonction des mécanismes physiques causant ces effets.

On notera que le terme «mois le plus défavorable» utilisé dans le cadre de la présente Recommandation est équivalent au terme «mois quelconque» (voir la Recommandation UIT-R P.581).

## 2 Affaiblissement de propagation

Sur le trajet d'un faisceau hertzien de Terre à visibilité directe, l'affaiblissement de propagation par rapport à l'affaiblissement en espace libre (voir la Recommandation UIT-R P.525) est la résultante des différentes contributions ci-après:

- affaiblissement dû aux gaz de l'atmosphère,
- évanouissement par diffraction dû à l'obstruction, totale ou partielle, du trajet,
- évanouissement dû à la propagation par trajets multiples, étalement du faisceau et scintillation,
- affaiblissement dû à la variation de l'angle d'arrivée et de l'angle de départ,
- affaiblissement dû aux précipitations,
- affaiblissement dû aux tempêtes de sable et de poussière.

Chacune de ces composantes a ses propres caractéristiques, qui dépendent de la fréquence, de la longueur du trajet et de l'emplacement géographique. Ces composantes sont décrites dans les paragraphes qui suivent.

Quelquefois, on s'intéresse aussi aux renforcements dus à la propagation. Dans de tels cas, ce phénomène est traité à la suite de l'affaiblissement de propagation associé.

### 2.1 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 et on doit en 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:

$$A_a = \gamma_a d \quad \text{dB} \quad (1)$$

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

NOTE 1 – Pour de longs trajets 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. On trouve des informations sur la concentration en vapeur d'eau dans la Recommandation UIT-R P.836.

### 2.2 Evanouissements par diffraction

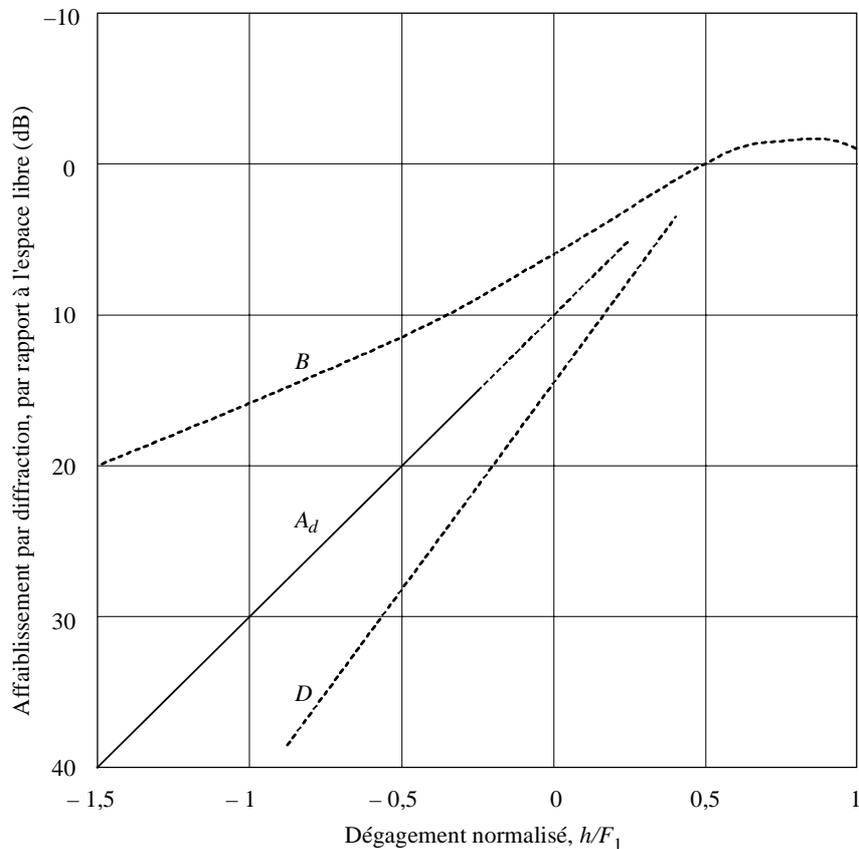
Les changements dans les conditions de réfraction de l'atmosphère entraînent des variations du rayon terrestre équivalent et donc du facteur  $k$  par rapport à la valeur médiane de ce dernier, qui est d'environ  $4/3$  pour l'atmosphère de référence (voir la Recommandation UIT-R P.310). Quand l'atmosphère est caractérisée par une infraréfraction suffisante (valeurs positives élevées du gradient de l'indice de réfraction, faibles valeurs du facteur  $k$ ), les rayons sont courbés de telle manière que la Terre obstrue le trajet direct entre l'émetteur et le récepteur, ce qui donne lieu à un genre d'évanouissement appelé évanouissement par diffraction. Cet évanouissement est le facteur qui détermine les hauteurs des antennes.

Les statistiques de  $k$  en un point peuvent se déduire de mesures ou de prévisions du gradient de l'indice de réfraction dans les 100 premiers mètres de l'atmosphère (voir la Recommandation UIT-R P.453 sur les effets de la réfraction). Pour obtenir la valeur équivalente de  $k$  pour la longueur du trajet considéré,  $k_e$ , il faut faire une moyenne des valeurs du gradient. Dans le paragraphe ci-après, on discute des valeurs de  $k_e$  qui sont dépassées pendant 99,9% du temps, en fonction de critères de dégagement du trajet.

**2.2.1 Dépendance de l'affaiblissement par diffraction par rapport au dégagement du trajet**

La profondeur des affaiblissements par diffraction dépend du type de terrain ainsi que de la végétation. Pour un dégagement donné du trajet du rayon, l'affaiblissement par diffraction varie entre une valeur minimale dans le cas d'un seul obstacle à arête en lame de couteau, et une valeur maximale dans le cas d'une Terre sphérique lisse. Les méthodes permettant de calculer l'affaiblissement par diffraction pour ces deux cas, ainsi que pour des trajets sur terrain irrégulier, sont étudiées dans la Recommandation UIT-R P.526. Les limites supérieure et inférieure de l'affaiblissement par diffraction sont représentées sur la Fig. 1.

FIGURE 1  
Affaiblissement par diffraction en cas d'obstacles sur les trajets de faisceaux hertziens à visibilité directe



- B: courbe théorique de l'affaiblissement par une arête en lame de couteau
- D: courbe théorique de l'affaiblissement par une Terre sphérique lisse à 6,5 GHz et pour  $k_e = 4/3$
- $A_d$ : courbe empirique de l'affaiblissement par diffraction fondée sur l'équation (2) pour un sol moyen
- $h$ : dégagement du trajet radioélectrique par rapport à la surface de la Terre
- $F_1$ : rayon de la première zone de Fresnel

0530-01

On obtient une valeur approchée de l'affaiblissement par diffraction au-dessus d'un terrain moyennement accidenté, lorsqu'il est supérieur à 15 dB environ, en appliquant la formule:

$$A_d = -20 h / F_1 + 10 \quad \text{dB} \quad (2)$$

$h$  étant l'écart vertical (m) entre la trajectoire du rayon et l'obstruction la plus significative ( $h$  est négatif si le sommet de l'obstacle considéré est au-dessus de la ligne de visibilité directe virtuelle) et  $F_1$  le rayon du premier ellipsoïde de Fresnel, donné par:

$$F_1 = 17,3 \sqrt{\frac{d_1 d_2}{f d}} \quad \text{m} \quad (3)$$

où:

$f$ : fréquence (GHz)

$d$ : longueur du trajet (km)

$d_1$  et  $d_2$ : distances entre les extrémités et le point d'obstruction du trajet (km).

Une courbe,  $A_d$ , illustrant l'équation (2) est représentée sur la Fig. 1. Cette courbe, qui ne s'applique strictement que pour des affaiblissements supérieurs à 15 dB, a été extrapolée jusqu'à la valeur de 6 dB pour répondre aux besoins des concepteurs de liaisons.

### 2.2.2 Critères de planification pour le dégagement du trajet

On a, dans le passé, atténué l'évanouissement par diffraction, aux fréquences supérieures à 2 GHz environ, en installant les antennes à une hauteur suffisante pour que, même lorsque la courbure des rayons est la plus accentuée, le récepteur ne se trouve pas dans la région de diffraction lorsque le rayon terrestre équivalent a une valeur inférieure à sa valeur normale. La théorie de la diffraction indique que le trajet direct entre l'émetteur et le récepteur doit être dégagé de tous obstacles à partir d'une hauteur au-dessus du sol au moins égale à 60% du rayon de la première zone de Fresnel, pour que les conditions de propagation en espace libre soient réalisées. Depuis peu, disposant de plus amples renseignements sur ce mécanisme ainsi que des statistiques de  $k_e$  dont on a besoin pour faire des prévisions statistiques, certaines administrations installent des antennes à des hauteurs pour lesquelles la durée d'interruption du service aura une valeur faible connue.

Faute d'une méthode générale faisant connaître une valeur prévisible de l'affaiblissement de diffraction pour de faibles pourcentages du temps et, par conséquent, un critère statistique de dégagement du trajet, il est recommandé d'appliquer la procédure suivante pour les climats tempérés et tropicaux.

#### 2.2.2.1 Configurations sans diversité d'espace

- Déterminer les hauteurs d'antennes nécessaires pour la valeur médiane appropriée du facteur  $k$  ponctuel (voir le § 2.2; 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);
- déduire de la Fig. 2 la valeur de  $k_e$  (99,9%) pour la longueur du trajet en question;
- calculer les hauteurs d'antenne nécessaires pour la valeur de  $k_e$  obtenue à l'étape b) ci-dessus ainsi que les rayons de dégagement de la zone de Fresnel suivants:

Climat tempéré	Climat tropical
0,0 $F_1$ (incidence rasante) s'il y a une source d'obstruction unique sur le trajet	0,6 $F_1$ pour les trajets de plus de 30 km environ
0,3 $F_1$ si l'obstruction s'étend sur toute une portion du trajet	

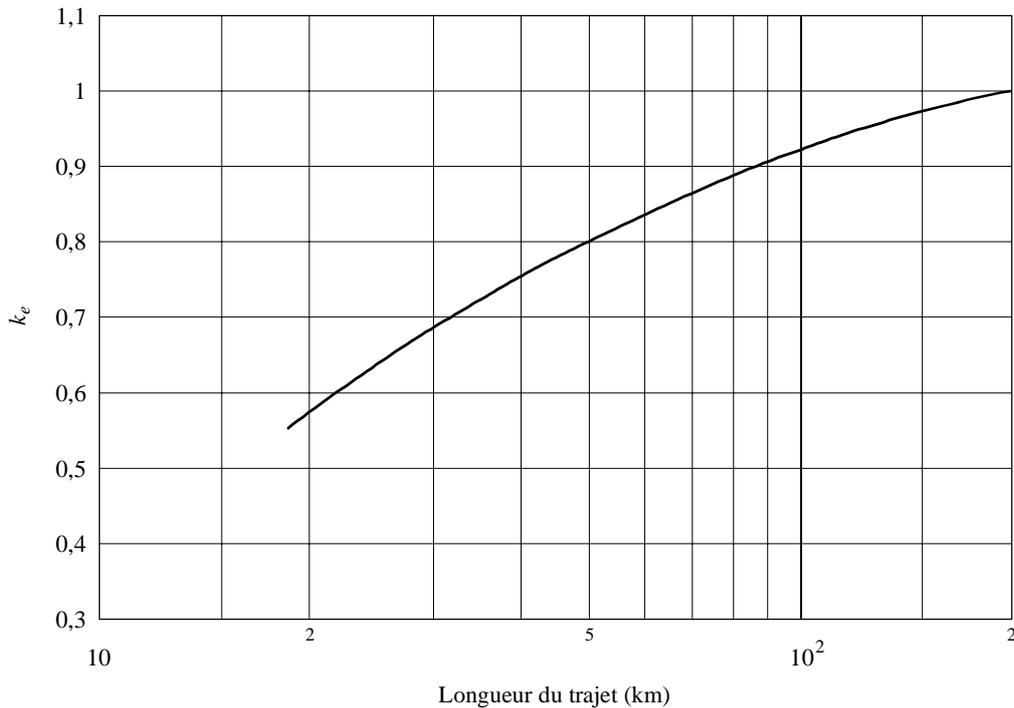
- retenir les plus grandes hauteurs d'antenne calculées lors des étapes a) et c).

En cas de doute sur le type de climat, on pourra se conformer à la loi de dégagement la plus pessimiste, celle des climats tropicaux, ou à la rigueur à une loi fondée sur une moyenne des dégagements pour les climats tempérés et tropicaux. Pour éviter d'avoir, à des fréquences inférieures à 2 GHz environ, des hauteurs d'antenne excessives, il pourra être nécessaire au cours des étapes a) et c) de multiplier  $F_1$  par des nombres plus petits.

Aux fréquences supérieures à 10 GHz environ, il peut être nécessaire d'utiliser une fraction plus importante de  $F_1$  au cours de l'étape c) afin de réduire le risque de diffraction dans les conditions d'infraréfraction.

FIGURE 2

Valeur de  $k_e$  dépassée durant approximativement 99,9% du mois le plus défavorable  
(Climat tempéré continental)



0530-02

### 2.2.2.2 Configuration à deux antennes pour diversité d'espace

a) Calculer la hauteur de l'antenne la moins élevée pour la valeur médiane convenable du facteur  $k$  ponctuel (en absence de données, prendre  $k = 4/3$ ) et les dégagements de zone de Fresnel suivants:

0,6  $F_1$  à 0,3  $F_1$  si l'obstruction s'étend sur toute une portion du trajet;

0,3  $F_1$  à 0,0  $F_1$  s'il y a une ou deux sources d'obstruction isolées sur le profil du trajet.

On peut, si nécessaire, retenir les valeurs les plus faibles des intervalles ci-dessus pour éviter d'avoir à surélever les pylônes ou si la fréquence est inférieure à 2 GHz.

On peut aussi choisir le dégagement de l'antenne la moins élevée de manière à avoir un affaiblissement de diffraction d'environ 6 dB sous des conditions de réfraction normales (c'est-à-dire au milieu du jour) ou une autre valeur d'affaiblissement qui convienne à la marge de protection contre les évanouissements du système telle qu'elle aura été déterminée par les mesures d'essai. Il faudra procéder aux mesures sur plusieurs jours différents pour éviter les conditions de réfraction anormales.

Dans ce cas, l'affaiblissement par diffraction peut aussi être estimé en utilisant la Fig. 1 ou l'équation (2).

b) Calculer la hauteur de l'antenne la plus élevée au moyen de la méthode ci-dessus valable pour une seule antenne.

c) Vérifier que l'écart entre les deux antennes répond aux exigences de la diversité dans le cas d'évanouissements dus à la propagation par trajets multiples. Sinon, accroître en conséquence la hauteur de l'antenne la plus élevée.

Cet évanouissement, qui est dû à l'obstruction, totale ou partielle, du trajet par le terrain dans des conditions d'infraréfraction, est le facteur qui détermine les hauteurs d'antennes.

## 2.3 Evanouissements et renforcements dus à la propagation par trajets multiples et mécanismes connexes

Trois mécanismes d'évanouissement par temps clair, dus à des couches très réfractives dans l'atmosphère, doivent être pris en considération dans la planification des faisceaux hertziens pour une longueur de trajet supérieure à quelques kilomètres: l'étalement du faisceau (souvent appelé «defocusing» en anglais), le découplage d'antenne, la propagation par

trajets multiples via la réflexion sur la surface de la Terre et via l'atmosphère. Ces mécanismes peuvent se produire indépendamment ou se combiner (voir la Note 1). Une forme particulièrement sévère d'évanouissement sélectif en fréquence se produit lorsque l'étalement du faisceau se combine avec une réflexion sur la surface de la Terre, donnant ainsi lieu à un évanouissement par trajets multiples. Des évanouissements par scintillation, dus aux irrégularités à plus petite échelle résultant de la turbulence atmosphérique, sont toujours présents avec ces mécanismes, mais leur contribution à la distribution statistique globale des évanouissements est négligeable aux fréquences inférieures à 40 GHz environ.

NOTE 1 – Le découplage d'antenne détermine la largeur minimale du faisceau d'antenne à utiliser.

Le § 2.3.1 propose une méthode de prévision de la distribution des évanouissements profonds à une seule fréquence (ou à bande étroite) pour le mois le plus défavorable moyen à un endroit quelconque de la Terre. Cette méthode ne fait pas appel au profil de trajet et peut être utilisée aux fins de la planification initiale, de l'octroi d'autorisations ou de la conception. Une deuxième méthode est présentée dans le § 2.3.2: elle convient pour toutes les profondeurs d'évanouissement. Pour les évanouissements profonds, elle fait appel à la méthode correspondante et, pour les évanouissements faibles, à une procédure d'interpolation.

Une méthode de prévision des renforcements du signal est donnée au § 2.3.3. Elle utilise comme seul paramètre d'entrée la profondeur d'évanouissement calculée par la méthode du § 2.3.1. Enfin, une méthode de conversion de la distribution pour le mois le plus défavorable moyen en distribution pour l'année moyenne est exposée au § 2.3.4.

### 2.3.1 Méthode pour les faibles pourcentages du temps

**2.3.1.1** Pour l'emplacement du trajet considéré, estimer le facteur géoclimatique  $K$  pour le mois le plus défavorable moyen, à partir des données d'évanouissement valables pour la région, si elles sont disponibles (voir l'Appendice 1).

*Liaisons terrestres:* si les données mesurées pour  $K$  ne sont pas disponibles, on peut estimer la valeur de  $K$  pour les liaisons terrestres (voir la définition donnée dans la Note 1). On effectue cette estimation à partir de la relation empirique suivante entre le facteur  $K$  et la variable climatique  $p_L$  (c'est-à-dire le pourcentage du temps pendant lequel le gradient du coïncide de réfraction dans les premiers 100 m de l'atmosphère est plus petit que  $-100$  unités N/km au cours du mois le plus défavorable moyen estimé; voir ci-dessous):

$$K = 5,0 \times 10^{-7} \times 10^{-0,1(C_0 - C_{Lat} - C_{Lon})} p_L^{1,5} \quad (4)$$

La valeur du coefficient  $C_0$  dans l'équation (4) est donnée dans le Tableau 1 pour trois plages d'altitude associées à la moins élevée des antennes d'émission et de réception et pour trois types de terrain (plaines, collines et montagnes). Si on hésite entre les catégories zone de plaines et zone de collines pour le classement d'une liaison, il faut utiliser la moyenne des coefficients  $C_0$  associés à chacun des deux types de zone. De même, si on hésite entre les catégories zone de collines et zone de montagnes pour le classement d'une liaison, il faut utiliser la moyenne des coefficients  $C_0$  associés à chacun des deux types de zone. Les liaisons passant au-dessus de plaines à une extrémité et de montagnes à l'autre extrémité doivent être classées dans la catégorie zone de collines. Pour la détermination de la catégorie (zone de plaines, de collines ou de montagnes) dans laquelle on doit classer un trajet passant partiellement au-dessus de l'eau, la surface de l'eau doit être considérée comme une plaine.

Lorsque le type de terrain n'est pas connu, il faut utiliser les valeurs du coefficient  $C_0$  ci-après dans l'équation (4), aux fins de planification:

$C_0 = 1,7$  si l'antenne la moins élevée est située entre 0 et 400 m au-dessus du niveau moyen de la mer;

$C_0 = 4,2$  si l'antenne la moins élevée est située entre 400 et 700 m au-dessus du niveau moyen de la mer;

$C_0 = 8$  si l'antenne la moins élevée est située à plus de 700 m au-dessus du niveau moyen de la mer.

Le coefficient  $C_{Lat}$  associé à la latitude  $\xi$  dans l'équation (4) est donné par:

$$C_{Lat} = 0 \quad (\text{dB}) \quad \text{pour } \xi \leq 53^\circ \text{ N ou } ^\circ \text{S} \quad (5)$$

$$C_{Lat} = -53 + \xi \quad (\text{dB}) \quad \text{pour } 53^\circ \text{ N ou } ^\circ \text{S} < \xi < 60^\circ \text{ N ou } ^\circ \text{S} \quad (6)$$

$$C_{Lat} = 7 \quad (\text{dB}) \quad \text{pour } \xi \geq 60^\circ \text{ N ou } ^\circ \text{S} \quad (7)$$

et le coefficient  $C_{Lon}$  associé à la longitude est donné par:

$$C_{Lon} = 3 \quad (\text{dB}) \quad \text{pour les longitudes d'Europe et d'Afrique} \quad (8)$$

$$C_{Lon} = -3 \quad (\text{dB}) \quad \text{pour les longitudes d'Amérique du Nord et du Sud} \quad (9)$$

$$C_{Lon} = 0 \quad (\text{dB}) \quad \text{pour toutes les autres longitudes} \quad (10)$$

TABLEAU 1

Valeurs du coefficient  $C_0$  dans les équations (4) et (13) pour trois plages d'altitude de l'antenne la moins élevée et trois types de terrain

Altitude de l'antenne la moins élevée et type de terrain au-dessus duquel passe la liaison	$C_0$ (dB)
<i>Altitude basse (0-400 m) – Plaines:</i> Liaisons passant entièrement ou partiellement au-dessus de terres, pouvant être classées dans la catégorie zone de plaines et pour lesquelles l'antenne la moins élevée est située à moins de 400 m au-dessus du niveau moyen de la mer.	0
<i>Altitude basse (0-400 m) – Collines:</i> Liaisons passant entièrement ou partiellement au-dessus de terres, pouvant être classées dans la catégorie zone de collines et pour lesquelles l'antenne la moins élevée est située à moins de 400 m au-dessus du niveau moyen de la mer.	3,5
<i>Altitude moyenne (400-700 m) – Plaines:</i> Liaisons passant entièrement ou partiellement au-dessus de terres, pouvant être classées dans la catégorie zone de plaines et pour lesquelles l'antenne la moins élevée est située entre 400 et 700 m au-dessus du niveau moyen de la mer.	2,5
<i>Altitude moyenne (400-700 m) – Collines:</i> Liaisons passant entièrement ou partiellement au-dessus de terres, pouvant être classées dans la catégorie zone de collines et pour lesquelles l'antenne la moins élevée est située entre 400 et 700 m au-dessus du niveau moyen de la mer.	6
<i>Altitude élevée (&gt;700 m) – Plaines:</i> Liaisons passant entièrement ou partiellement au-dessus de terres, pouvant être classées dans la catégorie zone de plaines et pour lesquelles l'antenne la moins élevée est située à plus de 700 m au-dessus du niveau moyen de la mer.	5,5
<i>Altitude élevée (&gt;700 m) – Collines:</i> Liaisons passant entièrement ou partiellement au-dessus de terres, pouvant être classées dans la catégorie zone de collines et pour lesquelles l'antenne la moins élevée est située à plus de 700 m au-dessus du niveau moyen de la mer.	8
<i>Altitude élevée (&gt;700 m) – Montagnes:</i> Liaisons passant entièrement ou partiellement au-dessus de terres, pouvant être classées dans la catégorie zone de montagnes et pour lesquelles l'antenne la moins élevée est située à plus de 700 m au-dessus du niveau moyen de la mer.	10,5

La valeur de la variable climatique  $p_L$  dans l'équation (4) est estimée par extraction, dans les cartes des quatre mois représentatifs des saisons (février, mai, août et novembre) indiquées dans les Fig. 7 à 10 de la Recommandation UIT-R P.453, de la plus grande valeur de dépassement du gradient à  $-100$  unités N/km, sauf pour les latitudes supérieures à  $60^\circ$  N ou  $60^\circ$  S, où seules les cartes pour les mois de mai et d'août doivent être utilisées.

Il est parfois souhaitable d'agrandir, dans les cartes des Fig. 7 à 10 de la Recommandation UIT-R P.453, la zone parcourue par la liaison examinée et de relever avec précision le point correspondant au centre de la liaison afin d'obtenir la valeur de la variable. Etant donné que les cartes sont en projection Mercator, la relation suivante doit être utilisée afin de relever avec précision les coordonnées du point central à une latitude  $\xi$ :

$$\Delta z_L = \Delta z \left[ \frac{\ln [\operatorname{tg} (45^\circ + 0,5 \xi)] - \ln [\operatorname{tg} (45^\circ + 0,5 \xi_1)]}{\ln [\operatorname{tg} (45^\circ + 0,5 \xi_2)] - \ln [\operatorname{tg} (45^\circ + 0,5 \xi_1)]} \right] \quad (11)$$

Dans cette formule,  $\Delta z$  est la distance (par exemple, en millimètres) entre les plus proches lignes supérieure et inférieure de l'abaque de latitude, correspondant aux latitudes  $\xi_1$  et  $\xi_2$  respectivement (par exemple,  $30^\circ$  et  $45^\circ$ ); le terme  $\Delta z_L$  est la distance requise (par exemple, en millimètres) entre la ligne inférieure de l'abaque de latitude et le point correspondant au centre de la liaison. La longitude de ce point peut être calculée par interpolation linéaire.

*Liaisons côtières au-dessus ou près de grandes étendues d'eau:* si les données mesurées pour calculer le facteur  $K$  ne sont pas disponibles pour des liaisons côtières (voir la définition donnée dans la Note 2) passant au-dessus ou près de grandes étendues d'eau (voir la définition des grandes étendues d'eau, donnée dans la Note 3), on peut estimer cet indice d'après les formules suivantes:

$$K = \begin{cases} K_l (r_c) = 10^{(1 - r_c) \log K_i + r_c \log K_{cl}} & \text{pour } K_{cl} \geq K_i \\ K_i & \text{pour } K_{cl} < K_i \end{cases} \quad (12)$$

où  $r_c$  est la fraction du profil de trajet située à une altitude inférieure à 100 m au-dessus du niveau moyen de l'étendue d'eau en question, en deçà de 50 km du littoral et sans terrain interposé dont l'altitude serait supérieure à 100 m, où  $K_i$  est donné par l'expression de  $K$  dans l'équation (4), et où:

$$K_{cl} = 2,3 \times 10^{-4} \times 10^{-0,1C_0 - 0,011 |\xi|} \quad (13)$$

où  $C_0$  est donné dans le Tableau 1. On notera que la condition  $K_{cl} < K_i$  dans l'équation (12) est vérifiée dans quelques régions à latitude faible ou moyenne.

*Liaisons côtières au-dessus ou près d'étendues d'eau de grandeur moyenne:* si l'on ne dispose pas de données mesurées pour le facteur  $K$  de liaisons côtières (voir la définition donnée dans la Note 2) au-dessus ou près de grandes étendues d'eau de grandeur moyenne (voir la définition des étendues d'eau de grandeur moyenne, donnée dans la Note 3), on peut estimer  $K$  au moyen des relations suivantes:

$$K = \begin{cases} K_m(r_c) = 10^{(1-r_c) \log K_i + r_c \log K_{cm}} & \text{pour } K_{cm} \geq K_i \\ K_i & \text{pour } K_{cm} < K_i \end{cases} \quad (14)$$

et:

$$K_{cm} = 10^{0,5 (\log K_i + \log K_{cl})} \quad (15)$$

le terme  $K_{cl}$  étant donné par l'équation (13). On notera que la condition  $K_{cm} < K_i$  dans l'équation (15) est vérifiée dans quelques régions à latitude faible ou moyenne.

NOTE 1 – Les liaisons terrestres sont celles dont tout le profil de trajet est à une altitude supérieure à 100 m (par rapport au niveau moyen de la mer) ou à plus de 50 km du littoral le plus proche. Ces liaisons sont aussi celles dont le profil de trajet est totalement ou partiellement à une altitude inférieure à 100 m pour une liaison s'inscrivant entièrement dans un rayon de 50 km à partir du littoral mais comportant une élévation de terre de plus de 100 m de hauteur, interposée entre cette partie de la liaison et le littoral. Les liaisons passant au-dessus d'un fleuve ou d'un petit lac doivent normalement être classées comme passant au-dessus de terres. Pour les liaisons passant au-dessus de régions comportant de nombreux lacs, voir la Note 4.

NOTE 2 – La liaison peut être considérée comme traversant une zone côtière si une fraction  $r_c$  du profil de trajet est située à une altitude inférieure à 100 m au-dessus du niveau moyen d'une étendue d'eau de grandeur moyenne ou importante, en deçà de 50 km du littoral et s'il n'y a pas de terrain dont l'altitude est supérieure à 100 m (par rapport au niveau moyen de l'étendue d'eau en question) entre cette fraction du profil de trajet et le littoral.

NOTE 3 – La taille d'une étendue d'eau peut être choisie sur la base de plusieurs exemples connus. Les étendues d'eau de grandeur moyenne comprennent la Baie de Fundy (côte est du Canada), le Détroit de Géorgie (côte ouest du Canada), le Golfe de Finlande et d'autres étendues d'eau de même grandeur. La Manche, la mer du Nord, les vastes étendues de la mer Baltique et de la mer Méditerranée, le Détroit d'Hudson et d'autres étendues d'eau de grandeur égale ou supérieure sont considérés comme de grandes étendues d'eau. Si l'on hésite à classer l'étendue d'eau en question dans la catégorie moyenne ou grande, il convient de calculer  $K$  à l'aide de la formule suivante:

$$K = 10^{(1-r_c) \log K_i + 0,5r_c (\log K_{cm} + \log K_{cl})} \quad (16)$$

NOTE 4 – Les régions (qui ne se trouvent pas dans des zones côtières) dans lesquelles de nombreux lacs recouvrent une surface assez importante sont assimilées à des zones côtières. La région des lacs au sud de la Finlande en est le meilleur exemple. Jusqu'à ce qu'on puisse mieux définir ces régions,  $K$  peut être calculé à partir de la formule suivante:

$$K = 10^{0,5[(2-r_c) \log K_i + r_c \log K_{cm}]} \quad (17)$$

**2.3.1.2** A partir des hauteurs d'antennes  $h_e$  et  $h_r$  (en mètres au-dessus du niveau de la mer, ou toute autre hauteur de référence), calculer l'inclinaison  $|\varepsilon_p|$  du trajet (mrad) à l'aide de la formule:

$$|\varepsilon_p| = |h_r - h_e| / d \quad (18)$$

où  $d$  est la longueur du trajet (km).

**2.3.1.3** Calculer le pourcentage du temps  $p_w$  pendant lequel une profondeur d'évanouissement  $A$  (dB) est dépassée pendant le mois le plus défavorable moyen, par la formule:

$$p_w = K d^{3,6} f^{0,89} (1 + |\varepsilon_p|)^{-1,4} \times 10^{-A/10} \quad \% \quad (19)$$

où  $f$  est la fréquence (GHz).

Pour prévoir les pourcentages de dépassement pendant l'année moyenne et non plus pendant le mois le plus défavorable moyen, voir le § 2.3.4.

NOTE 1 – L'équation (19) a été calculée sur la base de trajets de données sujets à évanouissements, d'une longueur comprise entre 7 et 95 km, de fréquence comprise entre 2 et 37 GHz, d'angle d'inclinaison de trajet compris entre 0 et 24 mrad et d'angle rasant compris entre 1 et 12 mrad. Des contrôles effectués avec plusieurs autres ensembles de données pour des trajets de longueur jusqu'à 237 km et de fréquence aussi basse que 500 MHz montrent cependant que cette équation est valide pour de plus larges plages de longueur et de fréquence. Les résultats d'une analyse semi-empirique montrent que la limite de validité en fréquence inférieure est inversement proportionnelle à la longueur du trajet. L'équation ci-dessous peut donner une estimation générale de cette limite de fréquence inférieure,  $f_{min}$ :

$$f_{min} = 15 / d \quad \text{GHz} \quad (20)$$

### 2.3.2 Méthode pour divers pourcentages de temps

La méthode décrite ci-dessous permettant de prévoir la profondeur des évanouissements pour différents pourcentages de temps combine une interpolation empirique entre la région des évanouissements profonds de la distribution et 0 dB, avec la méthode décrite dans les paragraphes précédents.

a) A l'aide de la méthode du § 2.3.1, calculer le pourcentage de temps  $p_w$  pendant lequel une profondeur d'évanouissement de 35 dB est dépassée dans la queue de la distribution (c'est-à-dire à l'aide de la formule (19)).

b) Calculer la valeur de  $q'_a$  pour une profondeur d'évanouissement  $A = 35$  dB avec la valeur correspondante de  $p_w$  obtenue à l'étape a) au moyen de la formule:

$$q'_a = -20 \log_{10} \left[ -\ln \left( \frac{100 - p_w}{100} \right) \right] / A \quad (21)$$

c) Calculer la valeur du paramètre  $q_t$  en appliquant la formule:

$$q_t = (q'_a - 2) / \left[ \left( 1 + 0,3 \times 10^{-A/20} \right) 10^{-0,016A} \right] - 4,3 \left( 10^{-A/20} + A / 800 \right) \quad (22)$$

d) Si  $q_t > 0$ , répéter les étapes a) à c) pour  $A = 25$  dB pour obtenir la valeur définitive de  $q_t$ .

e) Si  $A > 25$  dB ou  $A > 35$  dB, selon le cas, calculer le pourcentage de temps  $p_w$  pendant lequel la profondeur d'évanouissement  $A$  est dépassée en employant la méthode du § 2.3.1. Si  $A < 25$  dB ou  $A < 35$  dB, selon le cas, calculer le pourcentage de temps  $p_w$  pendant lequel  $A$  est dépassé en appliquant la formule:

$$p_w = 100 \left[ 1 - \exp \left( -10^{-q_a A / 20} \right) \right] \quad \% \quad (23)$$

où  $q_a$  est lui-même une fonction de  $A$  donnée par:

$$q_a = 2 + \left[ 1 + 0,3 \times 10^{-A/20} \right] \left[ 10^{-0,016A} \right] \left[ q_t + 4,3 \left( 10^{-A/20} + A / 800 \right) \right] \quad (24)$$

La valeur du paramètre  $q_t$  est ici celle obtenue à l'étape c) ou d), selon le cas. Le jeu de courbes de la Fig. 3, avec  $q_t$  comme paramètre, donne une représentation graphique de la méthode.

Pour prévoir les pourcentages de dépassement pendant l'année moyenne et non plus pendant le mois le plus défavorable moyen, voir le § 2.3.4.

### 2.3.3 Méthode de prévision des renforcements

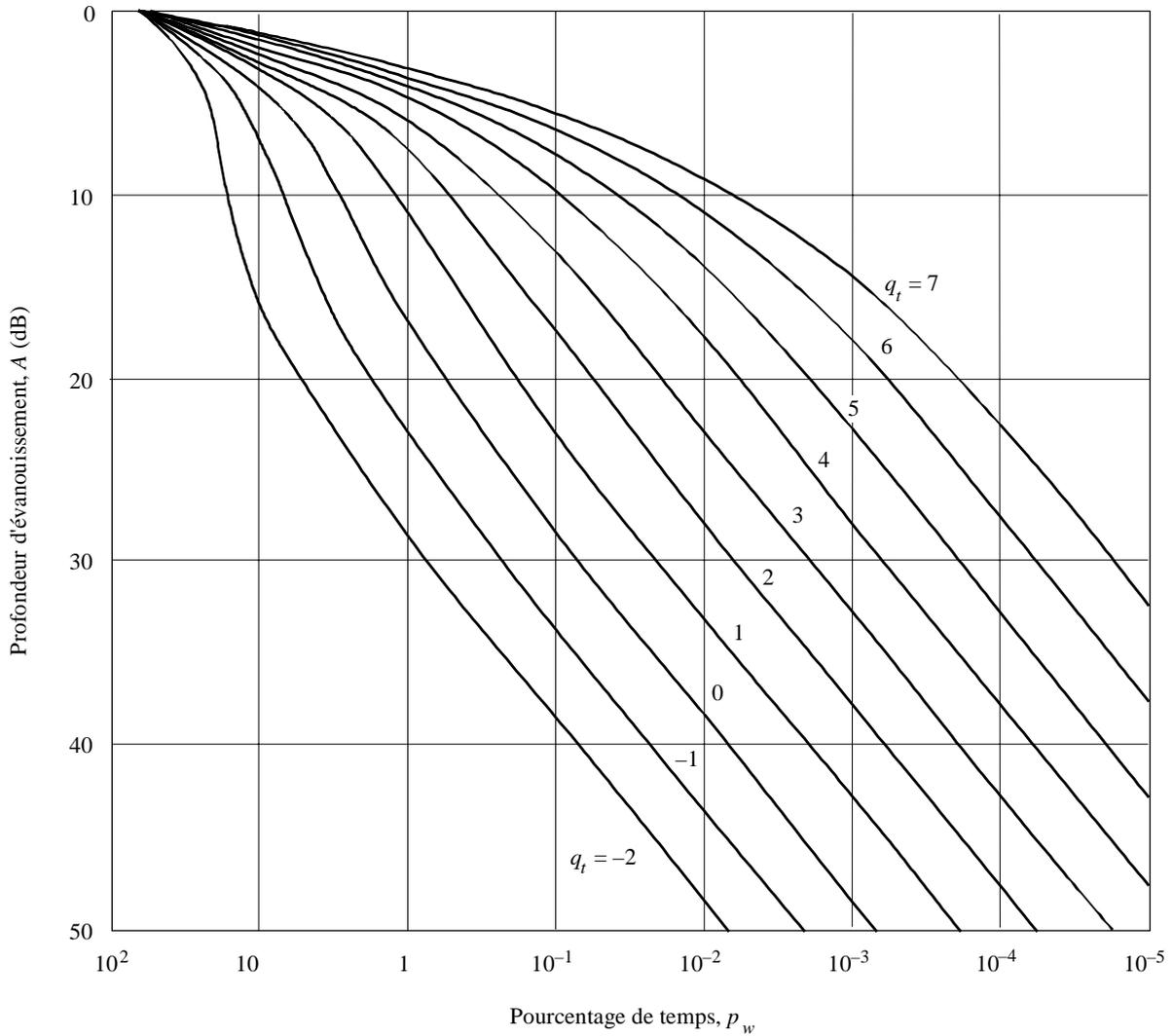
De forts renforcements de signal sont observés durant les mêmes conditions générales de conduits atmosphériques donnant lieu aux évanouissements par trajets multiples. On peut calculer la statistique des renforcements supérieurs à 10 dB pendant le mois le plus défavorable par la formule:

$$p_w = 100 - 10^{(-1,7 + 0,2 A_{0,01} - E) / 3,5} \quad \% \quad \text{pour } E > 10 \text{ dB} \quad (25)$$

où  $E$  (dB) est le renforcement non dépassé pendant  $p\%$  du temps et  $A_{0,01}$  est la profondeur prévue d'évanouissement dépassée pendant  $p_w = 0,01\%$  du temps, obtenue en utilisant l'équation (19).

FIGURE 3

Pourcentage de temps pendant lequel la profondeur d'évanouissement est dépassée pendant le mois le plus défavorable moyen,  $q_t$  (dans l'équation (24)) étant compris entre -2 et 7



0530-03

Pour les renforcements compris entre 10 et 0 dB, on peut utiliser la procédure pas à pas suivante:

a) Calculer le pourcentage du temps  $p'_w$  correspondant à un renforcement inférieur ou égal à 10 dB ( $E' = 10$ ) à l'aide de l'équation (25).

b) Calculer  $q'_e$  par:

$$q'_e = -\frac{20}{E'} \left( \log_{10} \left[ -\ln \left( 1 - \frac{100 - p'_w}{58,21} \right) \right] \right) \quad (26)$$

c) Calculer le paramètre  $q_s$  par:

$$q_s = 2,05 q'_e - 20,3 \quad (27)$$

d) Calculer  $q_e$  pour la valeur désirée de  $E$  par la formule:

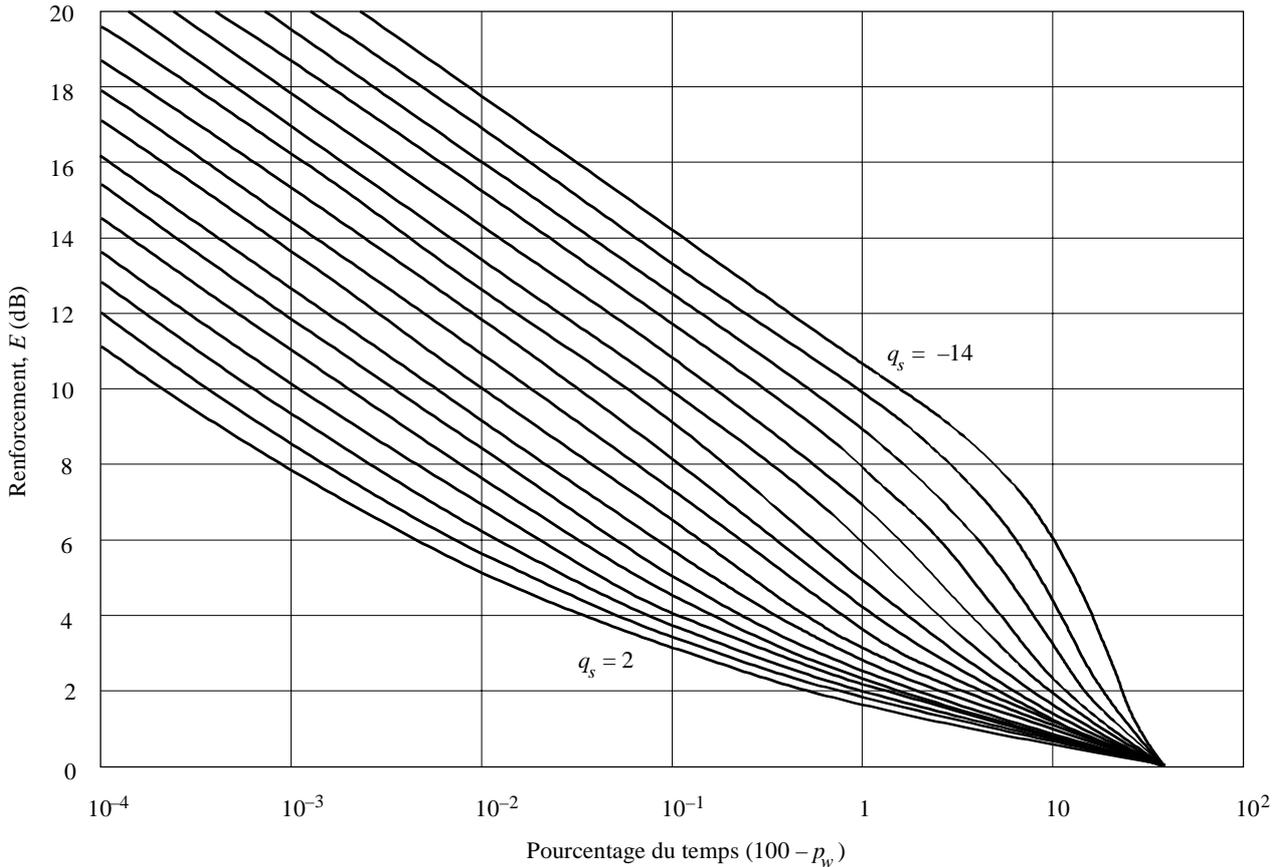
$$q_e = 8 + \left[ 1 + 0,3 \times 10^{-E/20} \right] \left[ 10^{-0,7 E/20} \right] \left[ q_s + 12 \left( 10^{-E/20} + E/800 \right) \right] \quad (28)$$

e) Le pourcentage du temps pendant lequel le renforcement  $E$  (dB) n'est pas dépassé est donné par:

$$p_w = 100 - 58,21 \left[ 1 - \exp\left(-10^{-q_s} q_e E/20\right) \right] \quad (29)$$

Le jeu de courbes de la Fig. 4, avec  $q_s$  comme paramètre, donne une représentation graphique de la méthode.

FIGURE 4  
Prévision des renforcements pour divers pourcentages du temps,  
 $q_s$  (dans l'équation (28)) étant compris entre -14 et 2



0530-04

Pour prévoir les pourcentages de dépassement pendant l'année moyenne et non plus pendant le mois le plus défavorable moyen, voir le § 2.3.4.

**2.3.4 Passage de la distribution pour le mois le plus défavorable moyen à la distribution pour l'année moyenne**

Les distributions d'évanouissements et de renforcement des signaux pour le mois le plus défavorable moyen, calculées d'après les méthodes décrites aux § 2.3.1 à 2.3.3, peuvent être converties en distributions pour l'année moyenne à l'aide de la procédure suivante:

- a) Calculer le pourcentage de temps  $p_w$  pendant lequel une profondeur d'évanouissement  $A$  est dépassée dans la queue de la distribution pendant le mois le plus défavorable moyen, de la formule (19).
- b) Calculer le facteur de conversion géoclimatique logarithmique  $\Delta G$  à partir de la formule:

$$\Delta G = 10,5 - 5,6 \log (1,1 \pm |\cos 2\xi|^{0,7}) - 2,7 \log d + 1,7 \log (1 + |\epsilon_p|) \quad \text{dB} \quad (30)$$

où  $\Delta G \leq 10,8$  dB et où on utilise le signe + pour  $\xi \leq 45^\circ$  et le signe – pour  $\xi > 45^\circ$ , et où:

$\xi$ : latitude ( $^\circ$ N ou  $^\circ$ S)

$d$ : longueur du trajet (km)

$|\varepsilon_p|$ : inclinaison du trajet (obtenue à partir de la formule (18)).

c) Calculer le pourcentage de temps  $p$  pendant lequel une profondeur d'évanouissement  $A$  est dépassée dans la queue de distribution où la profondeur d'évanouissement est importante pendant l'année moyenne, à l'aide de la formule:

$$p = 10^{-\Delta G/10} p_w \quad \% \quad (31)$$

d) S'il faut utiliser la gamme des évanouissements peu profonds de la distribution (c'est-à-dire:  $A < 25$  dB ou  $A < 35$  dB, selon le cas), suivre la méthode décrite au § 2.3.2, en remplaçant  $p_w$  par  $p$ .

e) S'il est nécessaire de prévoir la distribution du renforcement des signaux pendant l'année moyenne, suivre la méthode décrite au § 2.3.3, où  $A_{0,01}$  correspond maintenant à la profondeur d'évanouissement dépassée pendant 0,01% du temps de l'année moyenne. Calculer d'abord  $p_w$  en inversant la formule (31) et en utilisant  $p = 0,01\%$ . Calculer ensuite la profondeur d'évanouissement  $A_{0,01}$  dépassée pendant 0,01% du temps durant l'année moyenne en inversant la formule (19) et en utilisant  $p$  à la place de  $p_w$ .

### 2.3.5 Prévision des interruptions dues aux évanouissements non sélectifs (voir la Note 1)

Pour la conception d'une liaison numérique, il faut calculer la probabilité d'interruption  $P_{ns}$  due aux évanouissements non sélectifs (voir le § 7) au moyen de la formule:

$$P_{ns} = p_w / 100 \quad (32)$$

où  $p_w$  (%) est le pourcentage du temps pendant lequel la marge de protection contre les évanouissements uniformes  $A = F$  (dB) correspondant au taux d'erreur binaire spécifié (TEB) est dépassée pendant le mois le plus défavorable moyen ( $p_w$  est obtenu au moyen du § 2.3.1 ou 2.3.2, selon le cas). La marge de protection contre les évanouissements uniformes  $F$  est obtenue à partir du calcul de liaison et des renseignements fournis avec l'équipement concerné, elle tient compte également des réductions éventuelles dues au brouillage intrasystème.

NOTE 1 – L'interruption est associée à un certain taux d'erreur binaire (TEB) correspondant à un événement de seconde gravement entachée d'erreurs (voir le § 7 pour de plus amples renseignements).

### 2.3.6 Occurrence d'évanouissements simultanés dans les liaisons à bonds multiples

Des expériences montrent que lorsque des événements d'évanouissement supérieurs à 20 dB se produisent par temps clair sur des bonds adjacents dans une liaison à bonds multiples, ces événements sont presque totalement indépendants. Il en découle que, pour des systèmes analogiques ayant de grandes marges de protection contre les évanouissements, la durée d'interruption du service pour une série de bonds en cascade est approchée par la somme des durées d'interruption pour chaque bond.

Pour des profondeurs d'évanouissement ne dépassant pas 10 dB, la probabilité pour qu'une profondeur d'évanouissement donnée soit dépassée simultanément sur deux bonds adjacents peut être évaluée à partir de la formule suivante:

$$P_{12} = (P_1 P_2)^{0,8} \quad (33)$$

où  $P_1$  et  $P_2$  sont les probabilités de dépassement de la profondeur d'évanouissement en question sur chacun des deux bonds (voir la Note 1).

La corrélation entre les évanouissements sur bonds adjacents diminue à mesure que s'accroît la profondeur d'évanouissement entre 10 et 20 dB, de sorte que la probabilité pour qu'une profondeur d'évanouissement supérieure à 20 dB soit dépassée simultanément sur deux bonds adjacents peut être approchée par la formule suivante:

$$P_{12} = P_1 P_2 \quad (34)$$

NOTE 1 – La corrélation entre les évanouissements sur bonds adjacents devrait dépendre de la longueur du trajet. L'équation (33) donne une moyenne fondée sur les résultats de mesures faites sur 47 paires de bonds adjacents à visibilité directe exploités dans la bande des 5 GHz, avec des longueurs de trajet comprises entre 11 et 97 km et une longueur moyenne de trajet de 45 km.

## 2.4 Affaiblissement dû aux hydrométéores

L'affaiblissement peut aussi résulter de l'absorption et de la diffusion par des hydrométéores tels que la pluie, la neige, la grêle ou le brouillard. Bien qu'on puisse négliger l'affaiblissement dû à la pluie aux fréquences inférieures à 5 GHz environ, on doit en tenir compte dans les calculs relatifs aux fréquences plus élevées, car son importance augmente alors rapidement. Une technique pour estimer les statistiques à long terme de l'affaiblissement dû à la pluie est donnée au § 2.4.1. Sur les trajets situés aux latitudes élevées, ou même aux latitudes faibles mais à haute altitude, la neige mouillée peut causer un affaiblissement significatif et même dans une gamme de fréquences plus étendue. Pour les affaiblissements dus aux hydrométéores autres que la pluie, on se reportera à la Recommandation UIT-R P.840.

Aux fréquences pour lesquelles à la fois l'affaiblissement dû à la pluie et les évanouissements par trajets multiples doivent être pris en considération, les pourcentages de temps de dépassement d'un affaiblissement donné correspondant aux deux mécanismes peuvent être ajoutés.

### 2.4.1 Statistiques à long terme de l'affaiblissement dû à la pluie

Pour estimer les statistiques à long terme de l'affaiblissement dû à la pluie, on peut appliquer la méthode simple ci-après:

*Etape 1:* Chercher l'intensité de pluie  $R_{0,01}$  dépassée pendant 0,01% du temps (avec une durée d'intégration de 1 min). Si les mesures effectuées à long terme par des sources locales ne peuvent fournir ce renseignement, on peut en obtenir une estimation en se référant à la Recommandation UIT-R P.837;

*Etape 2:* Calculer l'affaiblissement linéique  $\gamma_R$  (dB/km) pour la fréquence, la polarisation et l'intensité de pluie considérées, en utilisant la Recommandation UIT-R P.838;

*Etape 3:* Calculer la longueur équivalente  $d_{eff}$  de la liaison en multipliant sa longueur réelle  $d$  par un facteur de distance  $r$ , que l'on peut prendre égal à:

$$r = \frac{1}{1 + d/d_0} \quad (35)$$

où, pour  $R_{0,01} \leq 100$  mm/h:

$$d_0 = 35 e^{-0,015 R_{0,01}} \quad (36)$$

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

*Etape 4:* Une valeur approchée de l'affaiblissement sur le trajet, dépassé pendant 0,01% du temps est donnée par:

$$A_{0,01} = \gamma_R d_{eff} = \gamma_R dr \quad \text{dB} \quad (37)$$

*Etape 5:* Les valeurs des affaiblissements dépassés pendant d'autres pourcentages de temps  $p$ , dans la gamme située entre 0,001% et 1%, peuvent se calculer d'après la loi en puissance suivante:

$$\frac{A_p}{A_{0,01}} = 0,12 p^{-(0,546 + 0,043 \log_{10} p)} \quad (38)$$

Cette formule a été établie de façon à obtenir des valeurs égales à 0,12; 0,39; 1 et 2,14 pour respectivement 1%, 0,1%, 0,01% et 0,001% du temps; elle ne peut être utilisée que dans ce domaine;

*Etape 6:* Si l'on s'intéresse à la statistique pour le mois le plus défavorable, on peut convertir les pourcentages  $p_w$  pour le mois le plus défavorable en pourcentages annuels en utilisant l'information relative aux climats donnée dans la Recommandation UIT-R P.841. Les valeurs de  $A$  dépassées pendant un pourcentage  $p$  du temps sur une base annuelle sont aussi celles qui sont dépassées pendant  $p_w$  % du temps du mois le plus défavorable.

La procédure de prévision décrite ci-dessus est considérée comme valide dans le monde entier, pour des fréquences jusqu'à 40 GHz et des longueurs de trajet jusqu'à 60 km.

### 2.4.2 Similitude en fréquence pour les statistiques à long terme de l'affaiblissement dû à la pluie

Lorsqu'on possède des données statistiques à long terme fiables d'affaiblissement mesurées à une fréquence, on peut appliquer la formule empirique ci-après pour obtenir une estimation grossière de la statistique de l'affaiblissement pour d'autres fréquences dans la gamme 7-50 GHz, pour la même longueur de trajet et dans la même région climatique:

$$A_2 = A_1 (\Phi_2 / \Phi_1)^1 - H(\Phi_1, \Phi_2, A_1) \quad (39)$$

où:

$$\Phi(f) = \frac{f^2}{1 + 10^{-4} f^2} \quad (40)$$

$$H(\Phi_1, \Phi_2, A_1) = 1,12 \times 10^{-3} (\Phi_2 / \Phi_1)^{0,5} (\Phi_1 A_1)^{0,55} \quad (41)$$

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

### 2.4.3 Similitude en polarisation pour les statistiques à long terme de l'affaiblissement dû à la pluie

Lorsque l'on possède des statistiques d'affaiblissement à long terme sur une liaison donnée pour une polarisation (verticale ou horizontale), on peut obtenir l'affaiblissement sur la même liaison pour l'autre polarisation en appliquant les formules simples ci-après:

$$A_V = \frac{300 A_H}{335 + A_H} \quad \text{dB} \quad (42)$$

ou

$$A_H = \frac{335 A_V}{300 - A_V} \quad \text{dB} \quad (43)$$

Ces expressions sont jugées valables pour les gammes de longueur de trajet et de fréquences de la méthode de prévision du § 2.4.1.

### 2.4.4 Statistiques de la durée des évanouissements

Il est évident que les évanouissements dus à la pluie sont beaucoup moins rapides que ceux dus à la propagation par trajets multiples. D'autre part, la moyenne et la médiane de la durée d'évanouissement diffèrent, ce qui indique que la distribution de la durée des évanouissements est asymétrique.

### 2.4.5 Trajets en cascade, trajets convergents et diversité de trajet

#### 2.4.5.1 Longueur des bonds

Les performances globales d'un système formé de sections connectées en cascade dépendent beaucoup des caractéristiques de propagation de chacune de ses sections. On peut parfois réaliser la même connexion physique au moyen de différentes combinaisons de longueurs de bonds. Si l'on augmente la longueur des bonds, on augmente inévitablement la probabilité d'interruption du service sur chacun d'eux. D'autre part, en agissant ainsi, il se peut que l'on réduise le nombre des bonds nécessaires et que, de ce fait, les performances globales du système en cascade n'en soient pas diminuées.

#### 2.4.5.2 Evanouissements corrélés sur des trajets en cascade

Si l'occurrence de la pluie était statistiquement indépendante de l'endroit, la probabilité globale d'évanouissement pour une série de trajets en cascade serait donnée avec une très bonne approximation par:

$$P_T = \sum_{i=1}^n P_i \quad (44)$$

où  $P_i$  est relatif au  $i$ -ème trajet sur un total de  $n$ .

D'autre part, si les événements de précipitation sont corrélés sur une certaine aire, les affaiblissements de deux ou plusieurs bonds en cascade seront aussi corrélés, auquel cas la probabilité combinée d'un évanouissement peut être écrite comme:

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

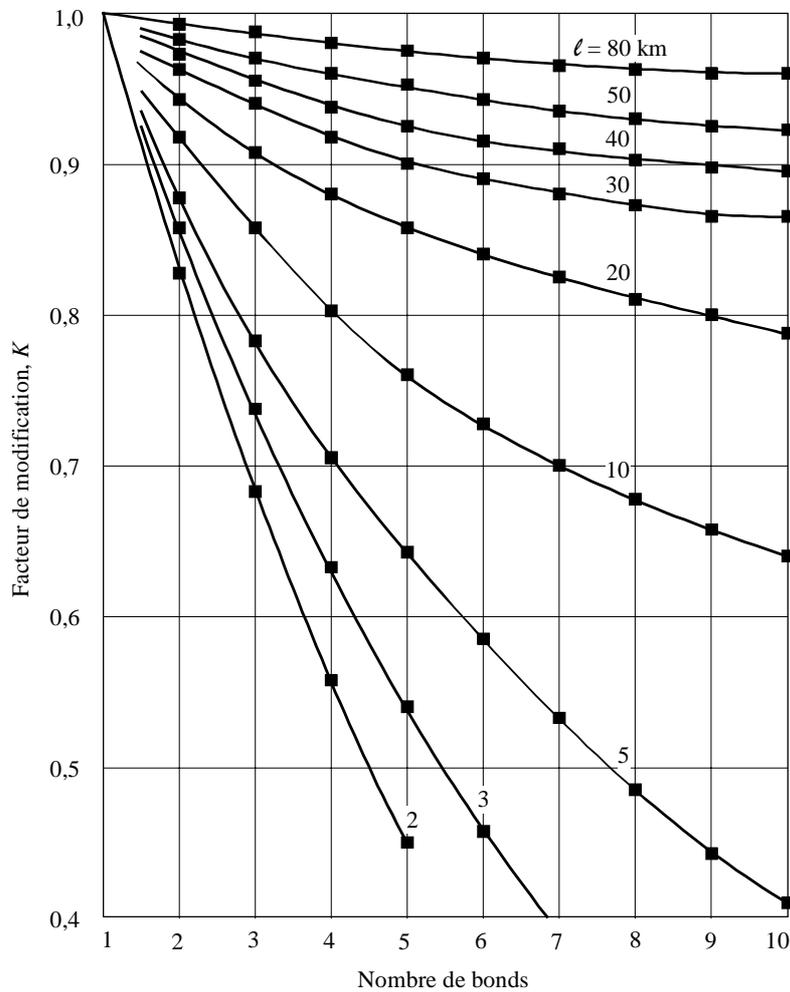
où  $K$  est un facteur de modification tenant compte des effets de corrélation des précipitations pluviales.

Il existe peu d'études sur cette question. L'une d'elles portait sur la corrélation instantanée des précipitations en des endroits situés sur un trajet allant d'est en ouest, c'est-à-dire à peu près parallèle à la direction dominante du déplacement des orages. Une autre expérience portait sur des mesures d'affaiblissement sur une série de bonds courts orientés nord-sud, c'est-à-dire à peu près perpendiculairement à la direction dominante de déplacement des orages pendant la saison des précipitations pluviales les plus intenses.

Pour le cas de liaisons parallèles à la direction de déplacement des orages, les effets de corrélation pour une série de bonds en cascade, ayant chacun des longueurs  $l$  supérieures à 40 km, se sont révélés faibles. Le facteur de modification  $K$  pour ce cas était supérieur à 0,9 pour une durée d'interruption causée par la pluie de 0,03%; on peut raisonnablement ignorer la corrélation pour un tel cas (voir la Fig. 5). Pour des bonds plus courts, cependant, les effets deviennent plus significatifs: la probabilité totale d'interruption pour 10 liaisons de 20, 10 et 5 km chacune est approximativement 80%, 65% et 40% de la prévision sans corrélation, respectivement (facteurs de modification égaux à 0,8; 0,65; 0,4). On voit que l'influence de la corrélation des précipitations est en quelque sorte plus grande pour les quelques premiers bonds, et décroît ensuite quand la longueur totale de la chaîne augmente.

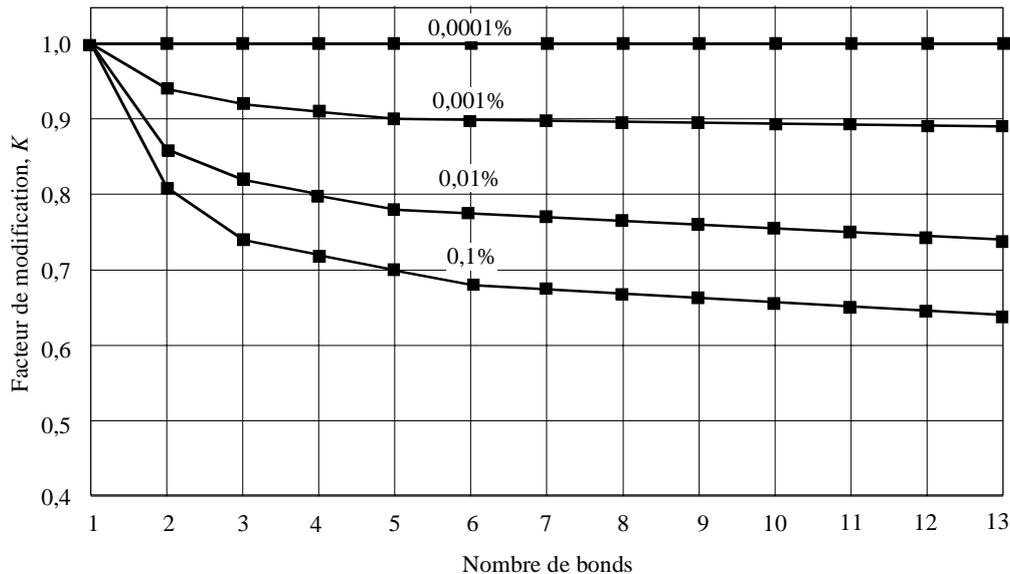
FIGURE 5

**Facteur de modification pour l'affaiblissement conjoint dû à la pluie pour une série de bonds en cascade, tous de même longueur,  $l$ , pour une probabilité de dépassement de 0,03% pour chaque bond**



Les facteurs de modification, pour le cas de la propagation dans une direction perpendiculaire à celle du mouvement dominant des orages, sont illustrés sur la Fig. 6 pour divers niveaux de probabilité. Dans une telle situation, les facteurs de modification décroissent plus rapidement pour les tout premiers bonds (indiquant une plus forte corrélation à courte distance que pour le cas de la propagation parallèle au mouvement des orages) et se maintiennent ensuite à une valeur stable (indiquant par là une plus faible corrélation à grande distance).

FIGURE 6  
**Facteur de modification pour l'affaiblissement conjoint dû à la pluie**  
**pour une série de bonds en cascade, chacun d'une longueur de 4,6 km environ,**  
**pour plusieurs niveaux de probabilité de dépassement sur chaque bond**  
 (Mai 1975-mars 1979)



0530-06

### 2.4.5.3 Trajets convergents

Lorsque deux trajets ou plus convergent vers une même station, le coefficient de corrélation entre les affaiblissements sur des paires de trajets dépend de l'angle entre ces trajets. Cette dépendance, ainsi que l'affaiblissement différentiel sur les trajets convergents et le brouillage entre trajets, ont été étudiés dans le cas où la longueur du trajet est plus petite que la cellule de pluie ou du même ordre de grandeur. A titre d'exemple, on a trouvé théoriquement que, pour un trajet de 4 km, le coefficient de corrélation croît de 0,8 à 0,97 quand l'angle que font les trajets décroît de 180° à 20°.

### 2.4.5.4 Diversité de trajet

Alors que les évanouissements dus à la propagation par trajets multiples peuvent être surmontés par une séparation verticale de quelques mètres des antennes, on peut être amené à choisir des trajets avec une séparation de plusieurs kilomètres pour réduire les évanouissements dus aux précipitations.

Des résultats expérimentaux obtenus au Royaume-Uni, dans la gamme 20-40 GHz, donnent une indication de l'amélioration qui peut être réalisée dans la fiabilité d'une liaison lorsqu'on applique une diversité par commutation de trajets. Le gain de diversité (c'est-à-dire, pour un pourcentage de temps donné, la différence entre l'affaiblissement (dB) dépassé sur une liaison unique et l'affaiblissement dépassé simultanément sur deux liaisons parallèles):

- a tendance à diminuer quand la longueur du trajet dépasse 12 km pour un pourcentage de temps donné, et pour une valeur donnée de l'espacement latéral entre les trajets;
- est, en général, plus grand pour un espacement de 8 km que pour 4 km (mais on n'obtient pas une amélioration supplémentaire en allant jusqu'à 12 km);
- ne dépend pas sensiblement de la fréquence dans la gamme 20-40 GHz, pour une configuration donnée;
- est compris entre les limites approximatives de 2,8 dB pour 0,1% du temps et 4,0 dB pour 0,001% du temps, pour un espacement de 8 km et pour des longueurs de trajet sensiblement égales. Pour un espacement de 4 km, les valeurs se situent entre 1,8 et 2,0 dB.

### 2.4.6 Prévision des interruptions dues aux précipitations

Pour la conception d'une liaison numérique, il faut calculer la probabilité  $P_{pluie}$  pour qu'un affaiblissement dû aux précipitations égal à la marge de protection contre les évanouissements uniformes  $F$  (dB) (voir le § 2.3.5) soit dépassé pour le taux d'erreur spécifié au moyen de la formule:

$$P_{pluie} = p / 100 \quad (46)$$

où  $p$  (%) est le pourcentage du temps pendant lequel un affaiblissement dû aux précipitations égal à  $F$  (dB) est dépassé pendant l'année moyenne ( $p$  s'obtient par la résolution de l'équation (38) du § 2.4.1).

## 3 Variations de l'angle d'arrivée et de l'angle de départ

La présence de gradients anormaux de l'indice de réfraction par temps clair le long d'un trajet peut entraîner des variations considérables de l'angle de départ de l'onde émise et de l'angle d'arrivée de l'onde reçue. Ces variations sont quasiment indépendantes de la fréquence et elles se produisent surtout dans le plan vertical des antennes. Le domaine de variation des angles est plus grand dans les régions côtières humides que dans les régions intérieures sèches. On n'a pas observé de changements significatifs en période de précipitation.

L'effet dont il s'agit peut être important sur les longs trajets sur lesquels on emploie des antennes à gain élevé et faisceau étroit. Si l'ouverture du faisceau est trop faible, il peut arriver que la direction de l'onde directe (émise ou reçue) se trouve suffisamment éloignée de l'axe pour qu'un évanouissement notable puisse se produire (voir le § 2.3). De plus, si l'alignement des antennes a eu lieu au cours de périodes pendant lesquelles les angles d'arrivée étaient très anormaux, il peut se faire que l'alignement n'ait pas été optimal. Par conséquent, lorsque l'on procède à l'alignement d'antennes sur des trajets critiques (par exemple sur des trajets de grande longueur dans des régions côtières), on peut avoir intérêt à vérifier l'alignement à plusieurs reprises sur une période de quelques jours.

## 4 Réduction de la discrimination de polarisation

La discrimination de polarisation (XPD) peut subir une dégradation suffisante pour produire des brouillages dans une même voie et, dans un moindre degré, des brouillages dans la voie adjacente. La réduction de la XPD qui se produit par temps clair et celle qui se produit en période de précipitation doivent toutes deux être prises en considération.

### 4.1 Prévision des interruptions dues aux effets par temps clair

L'effet combiné de la propagation par trajets multiples et des diagrammes en polarisation croisée des antennes détermine les réductions de la XPD pendant de faibles pourcentages du temps. Pour quantifier l'effet de ces réductions sur la qualité de fonctionnement de la liaison, il faut procéder selon les étapes données ci-après:

*Etape 1:* Calculer

$$XPD_0 = \begin{cases} XPD_g + 5 & \text{pour } XPD_g \leq 35 \\ 40 & \text{pour } XPD_g > 35 \end{cases} \quad (47)$$

où  $XPD_g$  est la XPD minimale garantie par le fabricant dans la direction de visée des antennes d'émission et de réception, c'est-à-dire la plus petite des valeurs de XPD associées aux directions de visée des antennes d'émission et de réception.

*Etape 2:* Evaluer la probabilité d'existence d'évanouissements par trajets multiples:

$$\eta = 1 - e^{-0,2(P_0)^{0,75}} \quad (48)$$

où  $P_0 = p_w/100$  est le facteur d'occurrence de trajets multiples correspondant au pourcentage de temps  $p_w$  (%) où  $A = 0$  dB est dépassé pendant le mois le plus défavorable moyen,  $p_w$  étant calculé au moyen de la formule (19).

*Etape 3:* Déterminer

$$Q = -10 \log \left( \frac{k_{xp} \eta}{P_0} \right) \quad (49)$$

où:

$$k_{xp} = \begin{cases} 0,7 & \text{une antenne d'émission} \\ 1 - 0,3 \exp \left[ -4 \times 10^{-6} \left( \frac{s_t}{\lambda} \right)^2 \right] & \text{deux antennes d'émission} \end{cases} \quad (50)$$

Lorsque les signaux polarisés orthogonalement sont émis par deux antennes différentes,  $s_t$  (m) désigne la séparation verticale et  $\lambda$  (m) désigne la longueur d'onde de la porteuse.

Etape 4: Déduire le paramètre C de la formule:

$$C = XPD_0 + Q \quad (51)$$

Etape 5: Calculer la probabilité d'interruption  $P_{xp}$  due à la polarisation croisée par temps clair au moyen de la formule:

$$P_{xp} = P_0 \times 10^{-\frac{M_{XPD}}{10}} \quad (52)$$

où  $M_{XPD}$  (dB), marge de XPD équivalente pour un TEB de référence, est donnée par:

$$M_{XPD} = \begin{cases} C - \frac{C_0}{I} & \text{sans XPIC} \\ C - \frac{C_0}{I} + XPIF & \text{avec XPIC} \end{cases} \quad (53)$$

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 XPD pour un rapport porteuse/bruit suffisamment élevé (en général 35 dB) et pour un TEB donné pour des systèmes avec et sans dispositif XPIC (réducteur de brouillage dû à la polarisation croisée). Une valeur type de XPIF est 20 dB environ.

## 4.2 Prévision des interruptions dues aux effets pendant les précipitations

### 4.2.1 Statistiques de la XPD dans les conditions de précipitations

La pluie intense détermine les réductions de la XPD observées aux faibles pourcentages du temps. Pour les 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, (voir le § 2.4), à l'aide de la relation d'équiprobabilité:

$$XPD = U - V(f) \log CPA \quad \text{dB} \quad (54)$$

valable pour la polarisation aussi bien rectiligne que circulaire. Les coefficients  $U$  et  $V(f)$  dépendent, en général, d'un certain nombre de variables et de 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 approximativement par les formules:

$$U = U_0 + 30 \log f \quad (55)$$

$$\begin{aligned} V(f) &= 12,8 f^{0,19} && \text{pour } 8 \leq f \leq 20 \text{ GHz} \\ V(f) &= 22,6 && \text{pour } 20 < f \leq 35 \text{ GHz} \end{aligned} \quad (56)$$

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 importante pour l'évaluation de la XPD. Il est conseillé à l'utilisateur d'employer la valeur de CPA de la polarisation circulaire quand on utilise la formule (54).

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

$$XPD_2 = XPD_1 - 20 \log (f_2/f_1) \quad \text{pour } 4 \leq f_1, f_2 \leq 30 \text{ GHz} \quad (57)$$

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'a pas tenu compte. La formule (57) est moins précise pour de grands écarts de fréquences. Elle est la plus précise lorsque  $XPD_1$  et  $XPD_2$  correspondent aux mêmes polarisations (horizontale ou verticale).

#### 4.2.2 Procédure de prévision des interruptions dues aux effets pendant les précipitations

*Etape 1:* Déterminer l'affaiblissement sur le trajet,  $A_{0,01}$  (dB), qui est dépassé pendant 0,01% du temps à partir de la formule (37).

*Etape 2:* Déterminer l'affaiblissement équivalent sur le trajet,  $A_p$  (dB)

$$A_p = 10^{((U - C_0/I + XPIF) / V)} \quad (58)$$

où  $U$  est obtenu à partir de la formule (55) et  $V$  à partir de la formule (56),  $C_0/I$  (dB) est le rapport porteuse/brouillage défini pour le TEB de référence et pour les systèmes sans dispositif XPIC; XPIF (dB) est le facteur d'amélioration de la XPD pour le TEB de référence.

Si on n'utilise pas de dispositif XPIC, on met la valeur de XPIF à 0.

*Etape 3:* Déterminer les paramètres suivants:

$$m = \begin{cases} 23,26 \log [A_p / 0,12 A_{0,01}] & \text{si } m \leq 40 \\ 40 & \text{dans les autres cas} \end{cases} \quad (59)$$

et

$$n = (-12,7 + \sqrt{161,23 - 4m}) / 2 \quad (60)$$

Les valeurs valables de  $n$  sont situées entre  $-3$  et  $0$ . Il convient de noter que dans certains cas et en particulier en cas d'utilisation d'un dispositif XPIC, on peut obtenir des valeurs de  $n$  inférieures à  $-3$ . En pareil cas, il convient de noter que si  $p$  est inférieur à  $-3$ , on aura un TEB d'interruption inférieur à  $1 \times 10^{-5}$ .

*Etape 4:* Déterminer la probabilité d'interruption en appliquant la formule:

$$P_{XPR} = 10^{(n-2)} \quad (61)$$

## 5 Distorsion due aux effets de la propagation

La cause essentielle de la distorsion dans les liaisons en visibilité en ondes décimétriques et centimétriques réside dans la dépendance de l'affaiblissement et du temps de propagation de groupe par rapport à la fréquence pendant les conditions de trajets multiples par temps clair. Dans les systèmes analogiques, une augmentation de la marge de protection contre les évanouissements permettra d'améliorer la qualité de fonctionnement car l'incidence du bruit thermique est réduite. Dans les systèmes numériques, il ne servira à rien d'utiliser une marge de protection contre les évanouissements plus élevée si ce sont les évanouissements sélectifs en fréquence qui entraînent une réduction de la qualité de fonctionnement.

La modélisation du canal de propagation repose le plus souvent sur l'hypothèse selon laquelle le signal suit plusieurs trajets ou rayons, entre l'émetteur et le récepteur. Ces trajets comprennent le trajet direct dans l'atmosphère et peuvent comprendre un ou plusieurs autres trajets provenant d'une réflexion au sol ou d'une réfraction dans l'atmosphère. Si le signal direct et une réplique très retardée d'amplitude pratiquement égale arrivent au niveau du récepteur, il se produira un brouillage intersymboles qui pourra conduire à une erreur de détection des informations. Les méthodes de prévision de la qualité de fonctionnement utilisent un modèle à rayons multiples fondé sur l'intégration de diverses variables

comme le retard (écart temporel entre le premier rayon arrivé et les autres) et les distributions d'amplitude dans un modèle propre faisant intervenir les caractéristiques des équipements comme les modulateurs, égaliseurs, modules de correction d'erreur directe (CED), etc. Il existe de nombreuses méthodes, mais on peut les regrouper en trois catégories générales sur la base de l'utilisation d'une signature de système, d'une distorsion d'amplitude linéaire ou d'une marge nette de protection contre les évanouissements. Pour la méthode fondée sur la signature, on emploie souvent un modèle de simulation à deux rayons utilisé en laboratoire et on relie les informations simulées à d'autres informations, par exemple sur l'occurrence de trajets multiples et sur les caractéristiques de la liaison. Pour la méthode fondée sur la distorsion d'amplitude linéaire, on évalue, sur un trajet donné, la distribution des distorsions qu'on observerait pour deux fréquences de la bande radioélectrique et on utilise les caractéristiques des modulateurs et égaliseurs, etc. De même, pour la méthode fondée sur la marge nette de protection contre les évanouissements, on emploie des évaluations de distributions statistiques d'amplitudes ainsi que des informations relatives aux équipements, mais on utilise beaucoup plus d'informations que pour la méthode fondée sur la distorsion d'amplitude linéaire. Au § 5.1, c'est la méthode fondée sur la signature qui est recommandée pour la prévision des interruptions.

On pense que la distorsion résultant des précipitations est négligeable, et en tout cas bien moins significative que l'effet d'affaiblissement lui-même. On sait que les distorsions se produisent dans les bandes d'absorption aux ondes millimétriques et sub-millimétriques, mais leur effet sur les systèmes opérationnels n'est pas encore clairement établi.

### 5.1 Prévision des interruptions dans les systèmes numériques non protégés

La probabilité d'interruption est définie ici comme la probabilité pour que le TEB soit supérieur à un seuil donné.

*Etape 1:* Calculer le retard temporel moyen à partir de la formule:

$$\tau_m = 0,7 \left( \frac{d}{50} \right)^{1,3} \quad \text{ns} \quad (62)$$

où  $d$  est la longueur du trajet (km).

*Etape 2:* Calculer la probabilité d'existence d'évanouissements par trajets multiples  $\eta$  comme à l'étape 2 du § 4.1.

*Etape 3:* Calculer la probabilité d'interruption due aux évanouissements sélectifs à partir de la formule:

$$P_s = 2,15\eta \left( W_M \times 10^{-B_M/20} \frac{\tau_m^2}{|\tau_{r,M}|} + W_{NM} \times 10^{-B_{NM}/20} \frac{\tau_m^2}{|\tau_{r,NM}|} \right) \quad (63)$$

où:

$W_x$ : largeur de la signature (GHz)

$B_x$ : profondeur de la signature (dB)

$\tau_{r,x}$ : retard de référence (ns) utilisé pour obtenir la signature,  $x$  désignant soit des évanouissements avec phase minimale ( $M$ ) soit des évanouissements avec phase non minimale ( $NM$ ).

La définition des paramètres relatifs à la signature et la spécification de la manière d'obtenir la signature sont données dans la Recommandation UIT-R F.1093.

## 6 Méthodes propres à atténuer les effets de la propagation par trajets multiples

Les effets de l'évanouissement lent relativement non sélectif en fréquence (c'est-à-dire l'évanouissement «uniforme») dû à l'étalement du faisceau, ainsi que l'évanouissement sélectif en fréquence et plus rapide résultant de la propagation par trajets multiples peuvent être réduits par des techniques sans et avec diversité.

### 6.1 Techniques sans diversité

Les liaisons devraient être installées pour tirer profit du terrain de manière à augmenter l'inclinaison du trajet, car on sait qu'en augmentant l'inclinaison du trajet, on peut réduire les effets de l'étalement du faisceau, les évanouissements dus à la réflexion sur la surface de la Terre, ainsi que les évanouissements dus à la propagation par trajets multiples atmosphériques. Lorsque cela est possible, les trajets devraient aussi être choisis de manière à réduire le niveau des réflexions sur la surface de la Terre et ainsi diminuer l'occurrence des trajets multiples et des distorsions. Une technique consiste, pour les trajets passant au-dessus de l'eau, à tenter de placer le point de réflexion sur le sol plutôt que sur l'eau;

de même, pour les trajets mixtes au-dessus du sol et de l'eau, il convient d'éviter la réflexion sur de grandes surfaces lisses au sol. Une autre technique connue pour réduire la réflexion sur la surface de la Terre est de dépointier légèrement les antennes vers le haut. On n'a pas cependant encore une information suffisante sur les angles d'inclinaison les plus appropriés. Un compromis doit être trouvé entre la perte de directivité des antennes que cette méthode entraîne dans des conditions de réfractivité normales, et l'amélioration obtenue dans les conditions de trajets multiples.

Une autre méthode encore, moins bien comprise, consiste à réduire le dégagement du trajet. Dans ce cas, un compromis doit être trouvé entre la réduction des effets d'évanouissement et de distorsion dus aux trajets multiples et l'augmentation des évanouissements dus à l'infraréfraction.

## 6.2 Techniques avec diversité

Ces techniques comprennent la diversité d'espace, d'angle et de fréquence. La diversité de fréquence devrait être évitée autant que possible, afin d'économiser le spectre. Lorsque la diversité d'espace est utilisée, on devrait employer simultanément la diversité d'angle en dépointant les antennes vers le haut à des angles différents. La diversité d'angle peut aussi être utilisée dans les situations où une diversité d'espace appropriée n'est pas possible ou pour réduire la hauteur des pylônes.

Le degré d'amélioration apporté par toutes ces techniques dépend de la mesure dans laquelle les signaux des voies de diversité du système sont décorrélés. Dans le cas de systèmes analogiques à bande étroite, il suffit de déterminer l'amélioration des statistiques des évanouissements à une seule fréquence. S'agissant de systèmes numériques à large bande, l'amélioration de la diversité dépend également des statistiques de distorsion dans la bande.

Le facteur d'amélioration,  $I$ , due à la diversité relatif à la profondeur d'évanouissement,  $A$ , est défini par la formule:

$$I = p(A) / p_d(A) \quad (64)$$

où  $p_d(A)$  est le pourcentage de temps pendant lequel le signal combiné de diversité connaît simultanément un affaiblissement de profondeur supérieure à  $A$  et  $p(A)$  est le pourcentage relatif au trajet non protégé. Pour les systèmes numériques, le facteur d'amélioration due à la diversité est défini par le rapport des temps de dépassement d'un TEB donné, avec et sans diversité. Il n'est possible, à l'heure actuelle, de recommander une technique de prévision du facteur d'amélioration due à la diversité que pour les systèmes à bande étroite utilisant la diversité d'espace.

### 6.2.1 Techniques de diversité dans les systèmes analogiques

Le facteur d'amélioration due à une diversité d'espace dans le plan vertical et pour des signaux à bande étroite sur des trajets situés au-dessus de la terre peut être estimé par la formule:

$$I = \left[ 1 - \exp \left( -3,34 \times 10^{-4} S^{0,87} f^{-0,12} d^{0,48} P_0^{-1,04} \right) \right] 10^{(A - V) / 10} \quad (65)$$

où:

$$P_0 = p_w \cdot 10^{A / 10} / 100 \quad (66)$$

et

$$V = |G_1 - G_2| \quad (67)$$

avec:

- $A$ : profondeur d'évanouissement pour le trajet non protégé (dB)
- $p_w$ : pourcentage du temps pendant lequel la profondeur d'évanouissement  $A$  est dépassée pendant le mois le plus défavorable moyen
- $P_0$ : facteur d'occurrence des évanouissements
- $S$ : séparation verticale (de centre à centre) entre les antennes de réception (m)
- $f$ : fréquence (GHz)
- $d$ : longueur du trajet (km)
- $G_1, G_2$ : gains des deux antennes (dBi).

Cette équation se fonde sur les données de la banque de données de la Commission d'études 3 des radiocommunications pour les domaines de paramètres suivants:  $43 \leq d \leq 240$  km,  $2 \leq f \leq 11$  GHz, et  $3 \leq S \leq 23$  m. Il y a des raisons de penser qu'elle pourrait être valable pour des longueurs de trajet aussi faibles que 25 km. Le pourcentage de dépassement  $p_w$  peut être calculé à partir de l'équation (19). L'équation (65) est valable dans le domaine des évanouissements profonds pour lequel l'équation (19) s'applique.

## 6.2.2 Techniques de diversité dans les systèmes numériques

Il existe des méthodes permettant de prévoir la probabilité d'interruption et l'amélioration due à la diversité pour les systèmes utilisant des techniques de diversité d'espace, de fréquence et angulaire ainsi que pour les systèmes employant une combinaison des techniques de diversité d'espace et de fréquence. Les procédures par étapes sont les suivantes.

### 6.2.2.1 Prévision des interruptions en cas d'utilisation de la diversité d'espace

Dans les systèmes utilisant la diversité d'espace, on a très largement utilisé des combineurs à puissance maximale jusqu'à maintenant. La procédure par étapes donnée ci-dessous s'applique aux systèmes utilisant un tel combineur. D'autres combineurs, plus sophistiqués, à distorsion minimale et puissance maximale fonction d'une évaluation du canal radioélectrique peuvent conduire à une qualité de fonctionnement quelque peu meilleure.

*Etape 1:* Calculer la probabilité d'existence d'évanouissements par trajets multiples  $\eta$  comme à l'étape 2 du § 4.1.

*Etape 2:* Calculer le carré du coefficient de corrélation des évanouissements non sélectifs  $k_{ns}$  au moyen de la formule:

$$k_{ns}^2 = 1 - \frac{I_{ns} \cdot P_{ns}}{\eta} \quad (68)$$

où le facteur d'amélioration  $I_{ns}$  peut être évalué à partir de la formule (65) pour une profondeur d'évanouissement,  $A$  (dB) correspondant à la marge de protection contre les évanouissements uniformes,  $F$  (dB) (voir le § 2.3.5) et  $P_{ns}$  à partir de la formule (32).

*Etape 3:* Calculer le carré du coefficient de corrélation des évanouissements sélectifs,  $k_s$ , au moyen de la formule:

$$k_s^2 = \begin{cases} 0,8238 & \text{pour } r_w \leq 0,5 \\ 1 - 0,195(1 - r_w)^{0,109 - 0,13 \log(1 - r_w)} & \text{pour } 0,5 < r_w \leq 0,9628 \\ 1 - 0,3957(1 - r_w)^{0,5136} & \text{pour } r_w > 0,9628 \end{cases} \quad (69)$$

où le coefficient de corrélation,  $r_w$ , des amplitudes relatives est donné par:

$$r_w = \begin{cases} 1 - 0,9746(1 - k_{ns}^2)^{2,170} & \text{pour } k_{ns}^2 \leq 0,26 \\ 1 - 0,6921(1 - k_{ns}^2)^{1,034} & \text{pour } k_{ns}^2 > 0,26 \end{cases} \quad (70)$$

*Etape 4:* Calculer la probabilité d'interruption due aux évanouissements non sélectifs,  $P_{dns}$ , au moyen de la formule:

$$P_{dns} = \frac{P_{ns}}{I_{ns}} \quad (71)$$

où  $P_{ns}$  est la probabilité d'interruption, lorsqu'aucune protection n'est utilisée, donnée par la formule (32).

*Etape 5:* Calculer la probabilité d'interruption due aux évanouissements sélectifs,  $P_{ds}$ , au moyen de la formule:

$$P_{ds} = \frac{P_s^2}{\eta(1 - k_s^2)} \quad (72)$$

où  $P_s$  est la probabilité d'interruption lorsqu'aucune protection n'est utilisée, donnée par la formule (63).

*Etape 6:* Calculer la probabilité totale d'interruption,  $P_d$ , comme suit:

$$P_d = \left( P_{ds}^{0,75} + P_{dns}^{0,75} \right)^{1,33} \quad (73)$$

### 6.2.2.2 Prévision des interruptions en cas d'utilisation de la diversité de fréquence

La méthode donnée s'applique à un système 1 + 1. On utilise la procédure donnée pour la diversité d'espace à la différence près qu'on emploie la formule suivante à l'étape 2:

$$I_{ns} = \frac{80}{fd} \left( \frac{\Delta f}{f} \right) 10^{F/10} \quad (74)$$

où:

$\Delta f$ : écart de fréquences (GHz)

$f$ : fréquence de la porteuse (GHz).

### 6.2.2.3 Prévision des interruptions en cas d'utilisation de la diversité d'angle

*Etape 1*: Evaluer l'angle d'arrivée moyen,  $\mu\theta$ , à partir de la formule:

$$\mu\theta = 2,89 \times 10^{-5} G_m d \quad \text{degrés} \quad (75)$$

où  $G_m$  est la valeur moyenne du gradient du coïndice (unités N/km). En cas de présence manifeste d'une forte réflexion au sol,  $\mu\theta$  peut être évalué à partir de l'angle d'arrivée du rayon réfléchi dans les conditions de propagation normalisées.

*Etape 2*: Calculer le paramètre de réduction des évanouissements non sélectifs,  $r$ , au moyen de la formule:

$$r = \begin{cases} 0,113 \sin [150(\delta/\Omega) + 30] + 0,963 & \text{pour } q > 1 \\ q & \text{pour } q \leq 1 \end{cases} \quad (76)$$

où:

$$q = 2505 \times 0,0437^{(\delta/\Omega)} \times 0,593^{(\varepsilon/\delta)} \quad (77)$$

et:

$\delta$ : écart angulaire entre les deux diagrammes

$\varepsilon$ : angle d'élévation de l'antenne la plus élevée (positif en direction du sol)

$\Omega$ : ouverture angulaire à mi-puissance des diagrammes de rayonnement des antennes.

*Etape 3*: Calculer le paramètre de corrélation des évanouissements non sélectifs,  $Q_0$ , au moyen de la formule:

$$Q_0 = r \left( 0,9399^{\mu\theta} \times 10^{-24,58 \mu\theta^2} \right) \left[ 2,469^{1,879(\delta/\Omega)} \times 3,615^{[(\delta/\Omega)^{1,978} (\varepsilon/\delta)]} \times 4,601^{[(\delta/\Omega)^{2,152} (\varepsilon/\delta)^2]} \right] \quad (78)$$

*Etape 4*: Calculer la probabilité d'existence d'évanouissements par trajets multiples,  $\eta$ , comme à l'étape 2 du § 4.1

*Etape 5*: Calculer la probabilité d'interruption due aux évanouissements non sélectifs au moyen de la formule:

$$P_{dns} = \eta Q_0 \times 10^{-\frac{F}{6,6}} \quad (79)$$

*Etape 6*: Calculer le carré du coefficient de corrélation des évanouissements sélectifs,  $k_s$ , au moyen de la formule:

$$k_s^2 = 1 - \left( 0,0763 \times 0,694^{\mu\theta} \times 10^{23,3 \mu\theta^2} \right) \delta \left( 0,211 - 0,188 \mu\theta - 0,638 \mu\theta^2 \right)^\Omega \quad (80)$$

*Etape 7*: La probabilité d'interruption due aux évanouissements sélectifs,  $P_{ds}$ , est donnée par:

$$P_{ds} = \frac{P_s^2}{\eta (1 - k_s^2)} \quad (81)$$

où  $P_s$  est la probabilité d'interruption lorsqu'aucune protection n'est utilisée (voir l'étape 3 du § 5.1).

Etape 8: Enfin, calculer la probabilité totale d'interruption,  $P_d$ , au moyen de la formule:

$$P_d = \left( P_{ds}^{0,75} + P_{dns}^{0,75} \right)^{1,33} \quad (82)$$

#### 6.2.2.4 Prévision des interruptions en cas d'utilisation de la diversité d'espace et de fréquence (deux récepteurs)

Etape 1: Le coefficient de corrélation des évanouissements non sélectifs,  $k_{ns}$ , est donné par:

$$k_{ns} = k_{ns,s} k_{ns,f} \quad (83)$$

où  $k_{ns,s}$  et  $k_{ns,f}$  sont les coefficients de corrélation des évanouissements non sélectifs calculés respectivement dans le cas de la diversité d'espace (voir le § 6.2.2.1) et dans le cas de la diversité de fréquence (voir le § 6.2.2.2).

Les étapes suivantes sont identiques à celles correspondant à la diversité d'espace.

#### 6.2.2.5 Prévision des interruptions en cas d'utilisation de la diversité d'espace et de fréquence (quatre récepteurs)

Etape 1: Calculer  $\eta$  comme à l'étape 2 du § 4.1.

Etape 2: Calculer le paramètre de diversité,  $m_{ns}$ , par:

$$m_{ns} = \eta^3 \left( 1 - k_{ns,s}^2 \right) \left( 1 - k_{ns,f}^2 \right) \quad (84)$$

où  $k_{ns,s}$  et  $k_{ns,f}$  sont obtenus comme au § 6.2.2.4.

Etape 3: Calculer la probabilité d'interruption due aux évanouissements non sélectifs  $P_{dns}$  au moyen de la formule:

$$P_{dns} = \frac{P_{ns}^4}{m_{ns}} \quad (85)$$

où  $P_{ns}$  est obtenu par la formule (32).

Etape 4: Calculer le carré du coefficient équivalent de corrélation des évanouissements non sélectifs,  $k_{ns}^2$ , au moyen de la formule:

$$k_{ns}^2 = 1 - \sqrt{\eta} \left( 1 - k_{ns,s}^2 \right) \left( 1 - k_{ns,f}^2 \right) \quad (86)$$

Etape 5: Calculer le coefficient équivalent de corrélation des évanouissements sélectifs,  $k_s$ , selon la procédure utilisée pour la diversité d'espace (étape 3).

Etape 6: La probabilité d'interruption due aux évanouissements sélectifs,  $P_{ds}$ , est donnée par:

$$P_{ds} = \left[ \frac{P_s^2}{\eta (1 - k_s^2)} \right]^2 \quad (87)$$

où  $P_s$  est la probabilité d'interruption lorsqu'aucune protection n'est utilisée, donnée par la formule (63).

Etape 7: La probabilité totale d'interruption,  $P_d$ , s'obtient alors par la formule (73).

## 7 Prévision de la probabilité totale d'interruption

La probabilité totale d'interruption due aux effets par temps clair est donnée par:

$$P_t = \begin{cases} P_{ns} + P_s + P_{XP} \\ P_d + P_{XP} \end{cases} \quad \text{en cas d'utilisation de techniques de diversité} \quad (88)$$

chacune des probabilités composantes étant obtenue selon les procédures données aux § 2.3.5, 4.1, 5.1 et 6.2.2.

La probabilité totale d'interruption due aux précipitations est donnée en prenant la plus grande des valeurs  $P_{pluie}$  et  $P_{XPR}$ , chacune des probabilités composantes étant obtenue selon les procédures données aux § 2.4.6 et 4.2.2.

Les méthodes de prévision des interruptions données pour les systèmes radioélectriques numériques ont été élaborées sur la base suivante: il y a interruption lorsque le TEB est supérieur à une valeur donnée (par exemple,  $1 \times 10^{-3}$ ); ceci afin de respecter les spécifications énoncées dans la Recommandation UIT-T G.821. Les interruptions sont liées à certaines caractéristiques d'erreur et à une certaine indisponibilité (voir les Recommandations UIT-R F.594, UIT-R F.634, UIT-R F.695, UIT-R F.696, UIT-R F.697, UIT-R F.1092, UIT-R F.1189 et UIT-R F.557). Les interruptions dues aux effets par temps clair sont principalement liées à certaines caractéristiques d'erreur et les interruptions dues aux précipitations à une certaine indisponibilité. Toutefois, les effets par temps clair pourront contribuer à une certaine indisponibilité de même que les précipitations pourront contribuer à certaines caractéristiques d'erreur.

Si les spécifications données dans la Recommandation UIT-T G.826 doivent être respectées, il faut que les méthodes de prévision soient fondées sur une évaluation des erreurs sur les blocs et non des erreurs sur les bits. Pour satisfaire les spécifications données dans la Recommandation UIT-T G.826, la liaison doit être conçue de manière à satisfaire un TEB autre que  $1 \times 10^{-3}$ : un TEB compris entre  $1 \times 10^{-5}$  et  $1 \times 10^{-4}$  pour les systèmes à 155 Mbit/s, en fonction de la longueur des salves d'erreur, et un TEB de  $1 \times 10^{-3}$  pour les systèmes à 2 Mbit/s.

#### APPENDICE 1 DE L'ANNEXE 1

### **Méthode de détermination du facteur géoclimatique, $K$ , à partir de données mesurées d'évanouissement sur des trajets au-dessus des terres**

*Etape 1:* Obtenir l'enveloppe de la distribution des évanouissements pendant le mois calendaire le plus défavorable, pour chaque année d'opération, en utilisant la valeur médiane à long terme comme référence. En prendre la moyenne pour obtenir la distribution cumulative des évanouissements pour le mois moyen le plus défavorable et porter celle-ci sur papier semi-logarithmique.

*Etape 2:* Sur le graphique, noter la profondeur d'évanouissement,  $A_1$ , au-delà de laquelle la distribution cumulative est approximativement rectiligne, et  $p_1$  le pourcentage de temps correspondant. Cette partie rectiligne forme la queue de la distribution pour les évanouissements profonds; la pente de cette queue peut varier de 3 ou 4 dB/décade au plus, par rapport à la valeur moyenne de 10 dB/décade de la loi de «Rayleigh», l'amplitude de cette variation dépendant du nombre d'années de mesure compris dans la distribution moyenne.

*Etape 3:* Calculer l'inclinaison du trajet  $|\epsilon_p|$  à partir de la formule (18).

*Etape 4:* Utiliser les coordonnées  $(p_1, A_1)$  du «premier point de la queue», ainsi que les valeurs de  $d, f, |\epsilon_p|$  dans la formule (19) pour obtenir le facteur géoclimatique  $K$ .

*Etape 5:* Si des données sont disponibles pour plusieurs trajets dans une région de climat et de terrain similaires, ou à plusieurs fréquences, etc., pour un même trajet, un facteur géoclimatique moyen peut être obtenu en calculant la moyenne de  $\log K$ .

---