

RECOMMANDATION UIT-R P.530-9

Données de propagation et méthodes de prévision nécessaires pour la conception de faisceaux hertziens à visibilité directe de Terre

(Question UIT-R 204/3)

(1978-1982-1986-1990-1992-1994-1995-1997-1999-2001)

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 les Annexes 1 et 2 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 (XPD) 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 XPD, cette Annexe se limite aux effets affectant le signal utile. Une certaine tolérance globale est définie au § 2.3.6 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 γ_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.

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:

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

où:

f : fréquence (GHz)

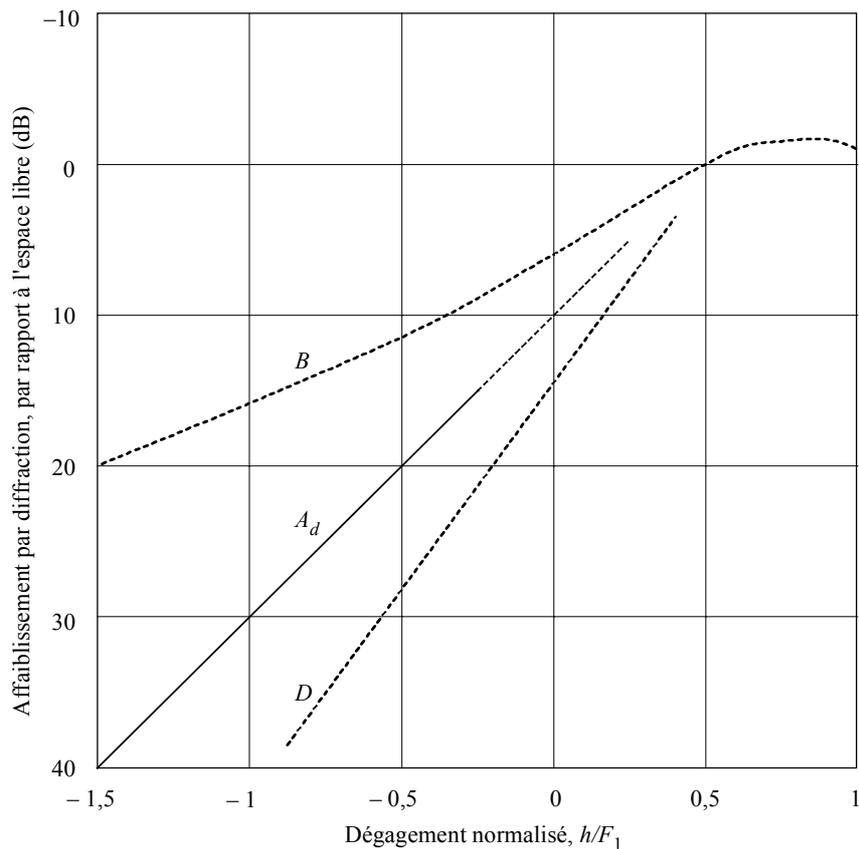
d : longueur du trajet (km)

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.

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

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

Etape 1: 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);

Etape 2: déduire de la Fig. 2 la valeur de k_e (99,9%) pour la longueur du trajet en question;

Etape 3: calculer les hauteurs d'antenne nécessaires pour la valeur de k_e obtenue à l'Etape 2 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 0,3 F_1 si l'obstruction s'étend sur toute une portion du trajet	0,6 F_1 pour les trajets de plus de 30 km environ

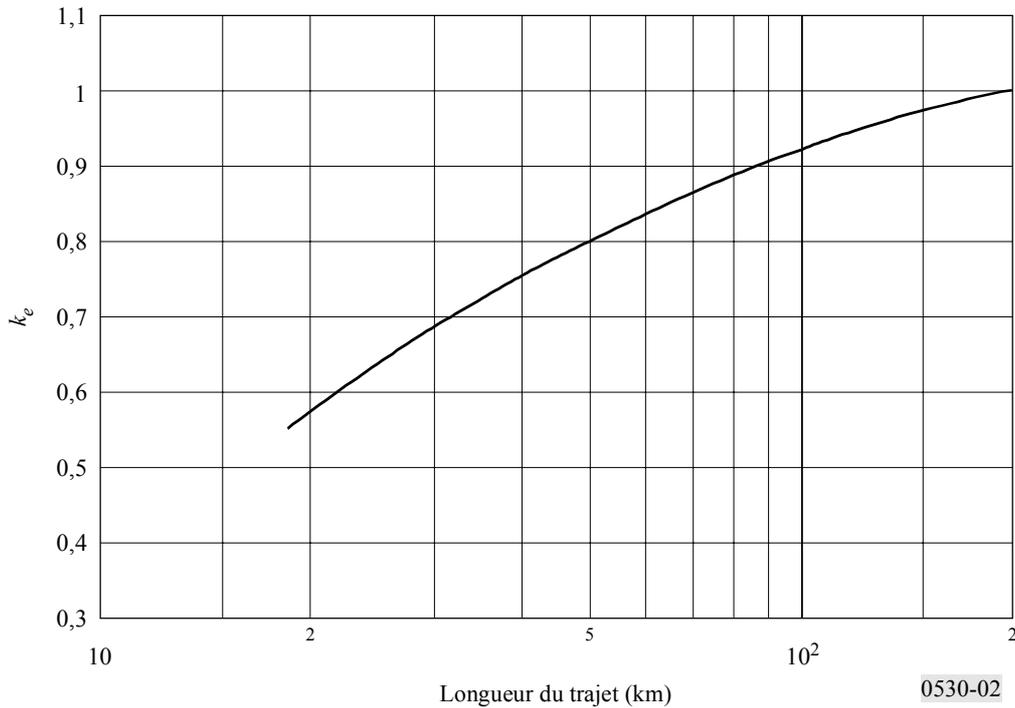
Etape 4: retenir les plus grandes hauteurs d'antenne calculées lors des Etapes 1 et 3.

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 Etapes 1 et 3 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'Etape 3 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

Etape 1: 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).

Etape 2: Calculer la hauteur de l'antenne la plus élevée au moyen de la méthode ci-dessus valable pour une seule antenne.

Etape 3: 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

Divers 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

Etape 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 considérée si elles sont disponibles (voir l'Appendice 1).

Si les données mesurées pour K ne sont pas disponibles et qu'une méthode de conception détaillée des liaisons est appliquée (voir la Note 1), estimer le facteur géoclimatique pour le mois le plus défavorable au moyen de l'équation:

$$K = 10^{-3,9-0,003dN_1 s_a -0,42} \quad (4)$$

où dN_1 est le gradient du coïndice au point considéré pour les 65 m inférieurs de l'atmosphère non dépassé pendant 1% d'une année moyenne, et s_a est la rugosité du terrain dans cette zone.

dN_1 est donné sur une grille de 1,5° en latitude et longitude dans la Recommandation UIT-R P.453. La valeur correcte en latitude et longitude au point milieu du trajet devrait être obtenue à partir des valeurs des quatre points de grille les plus proches par interpolation bilinéaire. Les données sont fournies sous la forme d'un tableau et sont disponibles auprès du Bureau des radiocommunications (BR).

s_a est défini comme étant l'écart type des hauteurs du terrain (m) dans une zone de 110 km × 110 km avec une résolution de 30 s (par exemple les données «gtopo30» Globe). La zone doit être alignée en longitude de façon que les deux moitiés égales de la zone soient situées de chaque côté de la ligne de longitude qui passe par le point milieu du trajet. Les données de terrain sont disponibles sur le web (l'adresse web peut être obtenue auprès du BR).

Si un calcul rapide de K est nécessaire pour des applications de planification (voir la Note 1), une approximation assez précise peut être obtenue au moyen de la formule:

$$K = 10^{-4,2-0,0029dN_1} \quad (5)$$

Etape 2: A partir des hauteurs d'antenne h_e et h_r ((m) au-dessus du niveau de la mer), calculer l'inclinaison du trajet $|\varepsilon_p|$ (mrad) au moyen de la formule:

$$|\varepsilon_p| = |h_r - h_e| / d \quad (6)$$

où d est la longueur du trajet (km).

Etape 3: Pour des applications de conception détaillée des liaisons (voir les Notes 1 et 2), calculer le pourcentage du temps p_w pendant lequel une profondeur d'évanouissement A (dB) est dépassée pendant le mois le plus défavorable au moyen de la formule:

$$p_w = Kd^{3,2} (1 + |\varepsilon_p|)^{-0,97} 10^{0,032f - 0,00085h_L - A/10} \quad \% \quad (7)$$

où f est la fréquence (GHz), h_L est l'altitude de l'antenne inférieure (c'est-à-dire la plus petite des valeurs de h_e et h_r), et où le facteur géoclimatique K est obtenu au moyen de la formule (4).

Pour des applications de planification rapides (voir les Notes 1 et 2), calculer le pourcentage du temps p_w pendant lequel une profondeur d'évanouissement A (dB) est dépassée pendant le mois le plus défavorable au moyen de la formule:

$$p_w = Kd^{3,0} (1 + |\varepsilon_p|)^{-1,2} 10^{0,033f - 0,001h_L - A/10} \quad \% \quad (8)$$

où K est obtenu au moyen de la formule (5).

NOTE 1 – Les écarts types globaux des erreurs de prévision obtenus en utilisant les formules (4) et (7), et (5) et (8), sont respectivement de 5,7 et 5,9 dB (y compris la contribution due aux variations d'une année à l'autre). Parmi le large éventail de trajets présentés dans ces figures, un écart type minimum 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 les formules (4) et (7) pour des liaisons sur des terrains très accidentés (par exemple des montagnes) ou des surfaces très lisses (par exemple des trajets au-dessus de l'eau). Les écarts types d'erreur pour des liaisons montagneuses ($h_L > 700$ m), par exemple, sont diminués de 0,6 dB, et les erreurs individuelles pour des liaisons passant au-dessus de zones montagneuses très élevées de plusieurs décibels.

NOTE 2 – Les formules (7) et (8), ainsi que les formules associées (4) et (5) relatives au facteur géoclimatique K , découlent de multiples régressions sur des données d'évanouissement pour 251 liaisons dans diverses zones géoclimatiques du monde avec des longueurs de trajet d allant de 7,5 à 185 km, des fréquences f allant de 450 MHz à 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 de coïndice dN_1 allant de -860 à -150 N unités/km et des rugosités de surface s_a allant de 6 à 850 m (si $s_a < 1$ m, utiliser une limite inférieure de 1 m).

Les formules (7) et (8) sont également considérées valables pour des fréquences allant jusqu'à au moins 45 GHz. Les résultats d'une analyse semi-empirique indiquent que la limite de fréquence inférieure est inversement proportionnelle à la longueur de trajet. Une estimation approximative de cette limite de fréquence inférieure, f_{min} , peut être obtenue au moyen de la formule:

$$f_{min} = 15 / d \quad \text{GHz} \quad (9)$$

2.3.2 Méthode pour tous les pourcentages de temps

La méthode décrite ci-dessous et visant à prévoir le pourcentage de temps pendant lequel toute profondeur d'évanouissement est dépassée combine la distribution des évanouissements profonds indiquée dans les paragraphes précédents et une interpolation empirique pour un évanouissement peu profond allant jusqu'à 0 dB.

Etape 1: Selon la méthode décrite au § 2.3.1, calculer le facteur d'occurrence de propagation par trajets multiples p_0 (c'est-à-dire la valeur au point d'intersection entre la courbe de distribution des évanouissements profonds et l'axe des pourcentages de temps):

$$p_0 = Kd^{3,2} (1 + |\varepsilon_p|)^{-0,97} 10^{0,032f - 0,00085h_L} \quad \% \quad (10)$$

pour des applications de conception détaillée de liaisons, avec K obtenu au moyen de l'équation (4), et

$$p_0 = Kd^{3,0} (1 + |\varepsilon_p|)^{-1,2} 10^{0,033f - 0,001h_L} \quad \% \quad (11)$$

pour des applications de planification rapides, avec K obtenu au moyen de la formule (5). Notez que les formules (10) et (11) sont équivalentes respectivement aux formules (7) et (8) avec $A = 0$.

Etape 2: Calculer la valeur de la profondeur d'évanouissement, A_t , à laquelle la transition se produit entre la distribution des évanouissements profonds et celle des évanouissements peu profonds, comme prévu par l'interpolation empirique:

$$A_t = 25 + 1,2 \log p_0 \quad \text{dB} \quad (12)$$

La procédure dépend maintenant du fait que A est supérieur ou inférieur à A_t .

Etape 3a: Si la profondeur d'évanouissement requise A est égale ou supérieure à A_t :

calculer le pourcentage de temps p_w pendant lequel A est dépassé pendant le mois le plus défavorable moyen:

$$p_w = p_0 \times 10^{-A/10} \quad \% \quad (13)$$

A noter que l'équation (13) est équivalente à l'équation (7) ou (8) selon le cas.

Etape 3b: Si la profondeur d'évanouissement requise A est inférieure à A_t :

calculer le pourcentage de temps p_t pendant lequel A_t est dépassé pendant le mois le plus défavorable moyen:

$$p_t = p_0 \times 10^{-A_t/10} \quad \% \quad (14)$$

A noter que l'équation (14) est équivalente à l'équation (7) ou (8) selon le cas avec $A = A_t$.

Calculer q'_a à partir de la valeur de l'évanouissement de transition A_t et du pourcentage de temps de transition p_t :

$$q'_a = -20 \log_{10} \left\{ -\ln \left[\left(100 - p_t \right) / 100 \right] \right\} / A_t \quad (15)$$

Calculer q_t à partir de q'_a et de la valeur de l'évanouissement de transition A_t :

$$q_t = (q'_a - 2) / \left[\left(1 + 0,3 \times 10^{-A_t/20} \right) 10^{-0,016 A_t} \right] - 4,3 \left(10^{-A_t/20} + A_t/800 \right) \quad (16)$$

Calculer q_a à partir de la valeur d'évanouissement A requis:

$$q_a = 2 + \left[1 + 0,3 \times 10^{-A/20} \right] \left[10^{-0,016 A} \right] \left[q_t + 4,3 \left(10^{-A/20} + A/800 \right) \right] \quad (17)$$

Calculer le pourcentage de temps p_w pendant lequel la profondeur d'évanouissement A (dB) est dépassée pendant le mois le plus défavorable moyen:

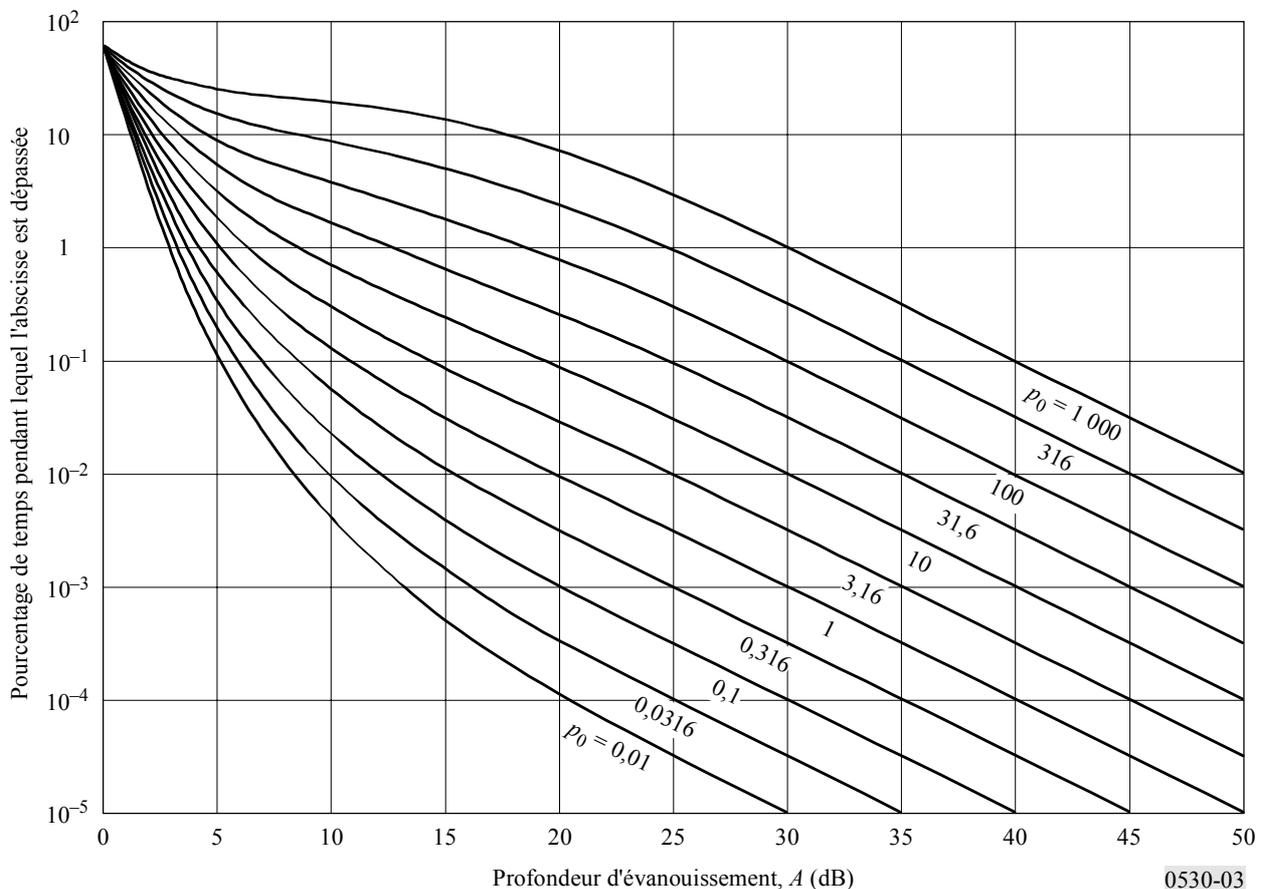
$$p_w = 100 \left[1 - \exp \left(-10^{-q_a A/20} \right) \right] \quad \% \quad (18)$$

A condition que $p_0 < 2\,000$, la procédure susmentionnée donne une variation monotone de p_w par rapport à A qui peut être utilisée pour déterminer A pour une valeur donnée de p_w au moyen d'une simple itération.

Le jeu de courbes de la Fig. 3, avec p_0 comme paramètre, donne une représentation graphique de la méthode.

FIGURE 3

Pourcentage de temps, p_w , profondeur d'évanouissement A dépassée pendant le mois le plus défavorable moyen, p_0 (équation (10) ou (11) selon le cas) étant compris entre 0,01 et 1 000



2.3.3 Méthode de prévision des renforcements

De forts renforcements des signaux 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 moyen par la formule:

$$p_w = 100 - 10^{(-1,7 + 0,2 A_{0,01} - E)/3,5} \quad \% \quad \text{pour } E > 10 \text{ dB} \quad (19)$$

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 (7) ou (8) selon le cas.

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

Etape 1: 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 (19).

Etape 2: Calculer q'_e par:

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

Etape 3: Calculer le paramètre q_s par:

$$q_s = 2,05 q'_e - 20,3 \quad (21)$$

Etape 4: Calculer q_e pour la valeur désirée de E par la formule:

$$q_e = 8 + \left[1 + 0,3 \times 10^{-E/20} \right] \left[10^{-0,7E/20} \right] \left[q_s + 12 \left(10^{-E/20} + E/800 \right) \right] \quad (22)$$

Etape 5: Le pourcentage du temps pendant lequel le renforcement E (dB) n'est pas dépassé est donné par:

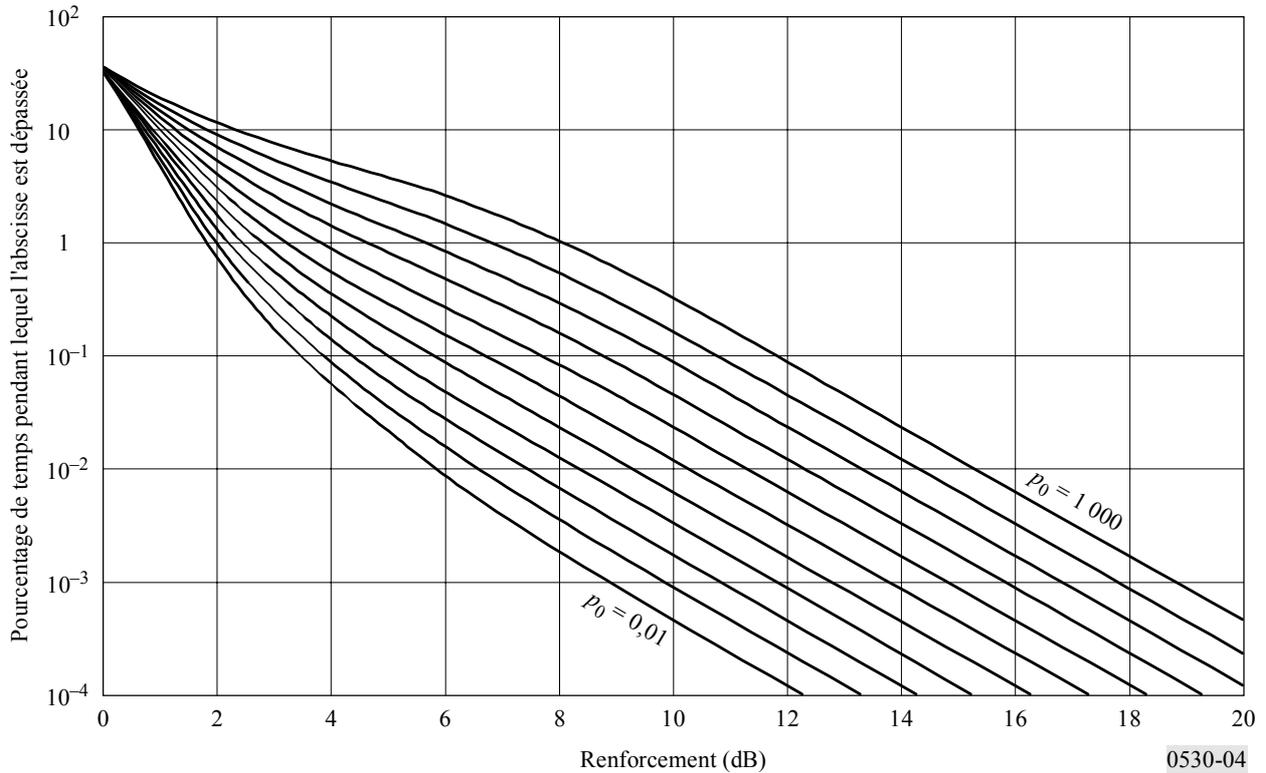
$$p_w = 100 - 58,21 \left[1 - \exp \left(-10^{-q_e E/20} \right) \right] \quad (23)$$

Le jeu de courbes de la Fig. 4 donne une représentation graphique de la méthode avec p_0 comme paramètre (voir l'équation (10) ou (11) selon le cas). Chaque courbe de la Fig. 4 correspond à la courbe de la Fig. 3 avec la même valeur de p_0 . Il convient de noter que la Fig. 4 donne le pourcentage de temps pendant lequel les renforcements sont dépassés qui correspond à $(100 - p_w)$, p_w étant donné par les équations (19) et (23).

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.

FIGURE 4

Pourcentage de temps, $(100 - p_w)$, renforcement E dépassé pendant le mois le plus défavorable moyen, p_0 (équation (10) ou (11) selon le cas) étant compris entre 0,01 et 1 000



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:

Etape 1: 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 (7) ou (8) selon le cas.

Etape 2: Calculer le facteur de conversion géoclimatique logarithmique ΔG à partir de la formule:

$$\Delta G = 10,5 - 5,6 \log \left(1,1 \pm |\cos 2\xi|^{0,7} \right) - 2,7 \log d + 1,7 \log (1 + |\varepsilon_p|) \quad \text{dB} \quad (24)$$

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:

ξ : latitude ($^\circ\text{N}$ ou $^\circ\text{S}$)

d : longueur du trajet (km)

$|\varepsilon_p|$: inclinaison du trajet (obtenue à partir de la formule (6)).

Etape 3: 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:

$$p = 10^{-\Delta G / 10} p_w \quad \% \quad (25)$$

Etape 4: S'il faut utiliser la gamme des évanouissements peu profonds de la distribution, suivre la méthode décrite au § 2.3.2, en remplaçant p_w par p .

Etape 5: 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 (25) 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 (7) ou (8) selon le cas et en utilisant p à la place de p_w .

2.3.5 Conversion de mois moyen le plus défavorable à périodes les plus défavorables plus courtes

Le pourcentage du temps p_w de dépassement d'un évanouissement profond A au cours du mois le plus défavorable moyen peut être converti en un pourcentage de temps p_{sw} de dépassement du même évanouissement profond au cours d'une période défavorable plus courte T au moyen des relations:

$$p_{sw} = p_w 10^{1,3-0,46 \log T} \quad \% \quad 1 \text{ h} \leq T < 720 \text{ h pour des trajets relativement plats} \quad (26)$$

$$p_{sw} = p_w 10^{2-0,7 \log T} \quad \% \quad 1 \text{ h} \leq T < 720 \text{ h pour des trajets accidentés} \quad (27)$$

$$p_{sw} = p_w 10^{2,5-0,87 \log T} \quad \% \quad 1 \text{ h} \leq T < 720 \text{ h pour des trajets montagneux} \quad (28)$$

NOTE 1 – Les formules (26) à (28) découlent de données relatives à 25 liaisons situées dans des zones tempérées pour lesquelles p_w a été estimé à partir de données portant sur des mois d'été.

2.3.6 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:

$$P_{ns} = p_w / 100 \quad (29)$$

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 (TEB) spécifié 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 à la conception de la liaison réelle.

NOTE 1 – Par commodité l'interruption est définie ici comme étant la probabilité que le TEB est supérieur à un seuil donné quel que soit ce seuil (voir le § 7 pour de plus amples renseignements).

2.3.7 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:

$$P_{12} = (P_1 P_2)^{0,8} \quad (30)$$

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:

$$P_{12} = P_1 P_2 \quad (31)$$

NOTE 1 – La corrélation entre les évanouissements sur bonds adjacents devrait dépendre de la longueur du trajet. L'équation (30) 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, γ_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:

$$r = \frac{1}{1 + d/d_0} \quad (32)$$

où, pour $R_{0,01} \leq 100$ mm/h:

$$d_0 = 35 e^{-0,015 R_{0,01}} \quad (33)$$

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:

$$A_{0,01} = \gamma_R d_{eff} = \gamma_R dr \quad \text{dB} \quad (34)$$

Etape 5: Pour les liaisons radioélectriques situées à des latitudes égales ou supérieures à 30° (Nord ou Sud), 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:

$$\frac{A_p}{A_{0,01}} = 0,12 p^{-(0,546 + 0,043 \log_{10} p)} \quad (35)$$

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: Pour les liaisons radioélectriques situées à des latitudes inférieures à 30° (Nord ou Sud), les valeurs des affaiblissements dépassés pendant d'autres pourcentages de temps p , entre 0,001% et 1%, peuvent se calculer d'après la loi en puissance suivante:

$$\frac{A_p}{A_{0,01}} = 0,07 p^{-(0,855 + 0,139 \log_{10} p)} \quad (36)$$

Cette formule a été déterminée de manière à donner des facteurs de 0,07, 0,36, 1 et 1,44 pour 1%, 0,1%, 0,01% et 0,001%, respectivement et ne doit être appliquée que dans cette plage.

Etape 7: 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:

$$A_2 = A_1 (\Phi_2 / \Phi_1)^{1 - H(\Phi_1, \Phi_2, A_1)} \quad (37)$$

où:

$$\Phi(f) = \frac{f^2}{1 + 10^{-4} f^2} \quad (38)$$

$$H(\Phi_1, \Phi_2, A_1) = 1,12 \times 10^{-3} (\Phi_2 / \Phi_1)^{0,5} (\Phi_1 A_1)^{0,55} \quad (39)$$

A_1 et A_2 sont les valeurs de l'affaiblissement supplémentaire dû à la pluie aux fréquences f_1 et f_2 (GHz) respectivement 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 (V) ou horizontale (H)), on peut obtenir l'affaiblissement sur la même liaison pour l'autre polarisation en appliquant les formules simples ci-après:

$$A_V = \frac{300 A_H}{335 + A_H} \quad \text{dB} \quad (40)$$

ou

$$A_H = \frac{335 A_V}{300 - A_V} \quad \text{dB} \quad (41)$$

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 et du nombre des événements

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 la durée. 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 longtemps). 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:

$$N(A) = T(A)/D_m(A) \quad (42)$$

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:

$$N_{10\text{ s}}(A) = a A^b \quad (43)$$

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 étaient les suivantes:

$$a = 5,7 \times 10^5 \quad b = -3,4 \quad (44)$$

Après avoir déterminé la valeur de $N_{10\text{ s}}(A)$ à partir de l'équation (43), il est possible de calculer la durée moyenne des évanouissements d'une durée égale ou supérieure à 10 s en inversant l'équation (42).

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 à l'indisponibilité 95% à 100% de tous les phénomènes dus à la pluie dont le niveau est supérieur à 15 dB environ. Cette fraction étant connue, il est possible de calculer la disponibilité en la multipliant par le pourcentage de temps total pendant lequel une valeur d'affaiblissement A donnée est dépassée, selon la méthode décrite au § 2.4.1.

2.4.5 Affaiblissement dû à la pluie dans les réseaux à bonds multiples

Il existe plusieurs configurations à bonds multiples qui présentent un intérêt dans les réseaux point à point dans lesquels la structure non uniforme des hydrométéores joue un certain rôle, notamment la configuration dans laquelle il existe une série de bonds dans un réseau en cascade ou plusieurs de ces séries de bonds dans un réseau à diversité de trajet.

2.4.5.1 Longueur des bonds dans un réseau en cascade

Les performances globales d'un réseau en cascade dépendent beaucoup des caractéristiques de propagation de chacun des bonds. 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 réseau en cascade n'en soient pas diminuées.

2.4.5.2 Evanouissements corrélés sur des bonds 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:

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

où P_i est relatif au i^{e} 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:

$$P_T = K \sum_{i=1}^n P_i \quad (46)$$

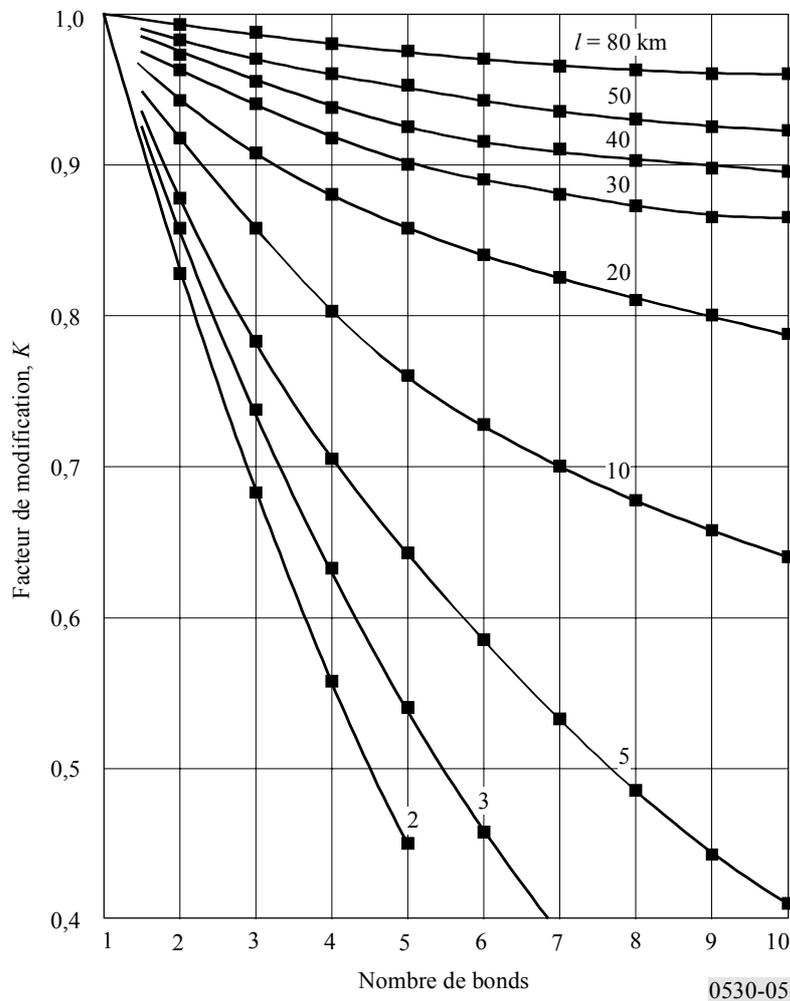
où K est un facteur de modification tenant compte des effets de corrélation des précipitations pluviales.

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**

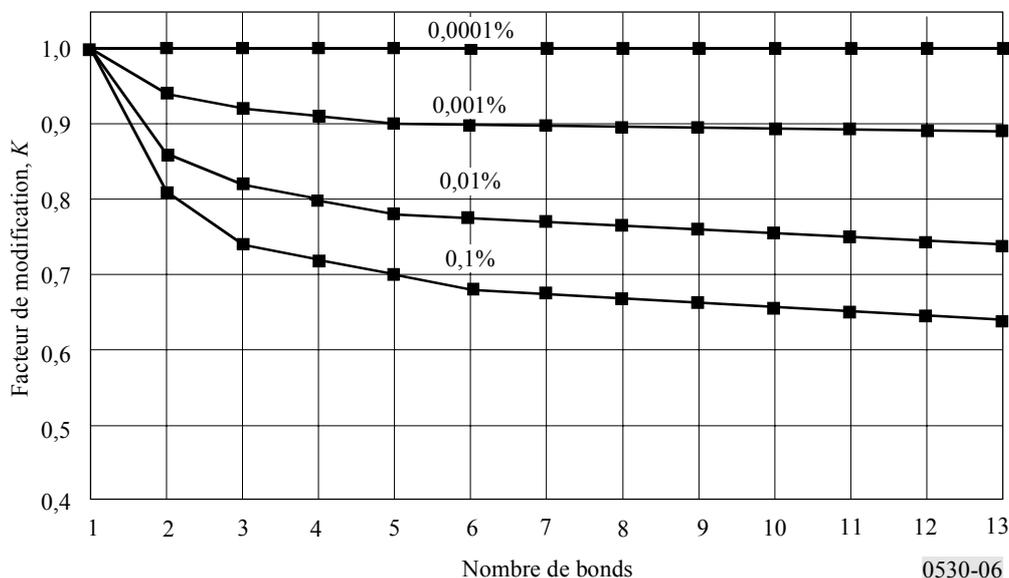


Les facteurs de modification, pour le cas de la propagation dans une direction perpendiculaire à celle du mouvement dominant des orages, sont illustrés sur la Fig. 6 pour divers niveaux de probabilité. Dans une telle situation, les facteurs de modification décroissent plus rapidement pour les tout premiers 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)



2.4.5.3 Réseaux à diversité d'acheminement

Du fait que la structure horizontale des précipitations peut changer notablement sur une fraction de kilomètre, les réseaux à diversité d'acheminement peuvent comprendre deux bonds ou plus en cascade dans deux trajets de diversité ou plus. Bien que l'on ne dispose pas d'informations sur l'amélioration de la diversité pour des réseaux à diversité d'acheminement complets, il existe quelques données sur des éléments de ce réseau, en particulier deux trajets convergeant vers un nœud de réseau et des trajets à peu près parallèles séparés horizontalement.

2.4.5.3.1 Éléments de trajets convergents

On peut trouver dans la Recommandation UIT-R P.1410 des informations sur le facteur d'amélioration de la 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, au nombre de deux.

2.4.5.3.2 Éléments de trajet parallèles séparés horizontalement

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 utilise des éléments de trajet parallèles de réseaux à diversité d'acheminement. 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 TEB spécifié au moyen de la formule:

$$P_{pluie} = p / 100 \quad (47)$$

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 (35) 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 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 de la XPD (discrimination de polarisation) 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:

$$XPD_0 = \begin{cases} XPD_g + 5 & \text{pour } XPD_g \leq 35 \\ 40 & \text{pour } XPD_g > 35 \end{cases} \quad (48)$$

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:

$$\eta = 1 - e^{-0,2(P_0)^{0,75}} \quad (49)$$

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 (7) ou (8) selon le cas.

Etape 3: Déterminer:

$$Q = -10 \log \left(\frac{k_{XP} \eta}{P_0} \right) \quad (50)$$

où:

$$k_{XP} = \begin{cases} 0,7 & \text{une antenne d'émission} \\ 1 - 0,3 \exp \left[-4 \times 10^{-6} \left(\frac{s_t}{\lambda} \right)^2 \right] & \text{deux antennes d'émission} \end{cases} \quad (51)$$

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

Etape 4: Déduire le paramètre C de la formule:

$$C = XPD_0 + Q \quad (52)$$

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

$$P_{XP} = P_0 \times 10^{-\frac{M_{XPD}}{10}} \quad (53)$$

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

$$M_{XPD} = \begin{cases} C - \frac{C_0}{I} & \text{sans XPIC} \\ C - \frac{C_0}{I} + XPIF & \text{avec XPIC} \end{cases} \quad (54)$$

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 Préviation des interruptions de la XPD 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:

$$XPD = U - V(f) \log CPA \quad \text{dB} \quad (55)$$

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:

$$U = U_0 + 30 \log f \quad (56)$$

$$\begin{aligned} V(f) &= 12,8 f^{0,19} && \text{pour } 8 \leq f \leq 20 \text{ GHz} \\ V(f) &= 22,6 && \text{pour } 20 < f \leq 35 \text{ GHz} \end{aligned} \quad (57)$$

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 (55).

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:

$$XPD_2 = XPD_1 - 20 \log (f_2 / f_1) \quad \text{pour } 4 \leq f_1, f_2 \leq 30 \text{ GHz} \quad (58)$$

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 (58) 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 préviation 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 (34).

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

$$A_p = 10^{((U - C_0/I + XPIF)/V)} \quad (59)$$

où U est obtenu à partir de la formule (56) et V à partir de la formule (57), 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:

$$m = \begin{cases} 23,26 \log \left[A_p / 0,12 A_{0,01} \right] & \text{si } m \leq 40 \\ 40 & \text{dans les autres cas} \end{cases} \quad (60)$$

et

$$n = \left(-12,7 + \sqrt{161,23 - 4m} \right) / 2 \quad (61)$$

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 1×10^{-5} .

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

$$P_{XPR} = 10^{(n - 2)} \quad (62)$$

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:

$$\tau_m = 0,7 \left(\frac{d}{50} \right)^{1,3} \quad \text{ns} \quad (63)$$

où d est la longueur du trajet (km).

Etape 2: Calculer la probabilité d'existence d'évanouissements par trajets multiples η comme à l'Etape 2 du § 4.1.

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

$$P_s = 2,15\eta \left(W_M \times 10^{-B_M/20} \frac{\tau_m^2}{|\tau_{r,M}|} + W_{NM} \times 10^{-B_{NM}/20} \frac{\tau_m^2}{|\tau_{r,NM}|} \right) \quad (64)$$

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

Plusieurs options peuvent être utilisées pour réduire les effets de l'évanouissement dû à la propagation par trajets multiples sans diversité pour des liaisons entre des tours existantes ou entre de nouvelles tours qui doivent être construites. Les lignes directrices données concernent trois aspects: réduction des niveaux de la réflexion au sol, augmentation de l'inclinaison du trajet et réduction du dégagement du trajet.

6.1.1 Réduction des niveaux de la réflexion au sol

Lorsque cela est possible, les trajets devraient 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 surface lisses au sol. Une autre technique connue pour réduire la réflexion sur la surface de la Terre est de dépointer 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.

6.1.2 Augmentation de l'inclinaison du trajet

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. Les positions sur la tour utilisées pour les liaisons radioélectriques devraient être choisies de manière à présenter les plus grandes inclinaisons possibles, en particulier pour les liaisons les plus longues.

6.1.3 Réduction du dégagement du trajet.

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. Il serait possible cependant, pour la configuration à diversité d'espace (voir le § 6.2), d'installer une antenne ayant un faible dégagement.

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 tours.

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:

$$I = p(A) / p_d(A) \quad (65)$$

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.

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:

$$I = \left[1 - \exp \left(-0,04 \times S^{0,87} f^{-0,12} d^{0,48} p_0^{-1,04} \right) \right] 10^{(A - V)/10} \quad (66)$$

où:

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

avec:

- A : profondeur d'évanouissement pour le trajet non protégé (dB)
- p_0 : facteur d'occurrence de propagation par trajets multiples (%) obtenu par la formule (10) ou (11)
- 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).

L'équation (66) 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 (7) ou (8) selon le cas. L'équation (66) est valable dans le domaine des évanouissements profonds pour lequel l'équation (7) ou (8) 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 η 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 (66) pour une profondeur d'évanouissement, A (dB) correspondant à la marge de protection contre les évanouissements uniformes, F (dB) (voir le § 2.3.6) et P_{ns} à partir de la formule (29).

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, lorsque aucune protection n'est utilisée, donnée par la formule (29).

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 lorsque aucune protection n'est utilisée, donnée par la formule (64).

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

$$P_d = \left(P_{ds}^{0,75} + P_{dns}^{0,75} \right)^{4/3} \quad (73)$$

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'Etape 2:

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

où:

Δf : écart de fréquences (GHz). Si $\Delta f > 0,5$ GHz, utiliser $\Delta f = 0,5$

f : fréquence de la porteuse (GHz)

F : marge d'évanouissement uniforme (dB).

Cette équation s'applique uniquement à la série de paramètres suivante:

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

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

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

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

Etape 1: Evaluer l'angle d'arrivée moyen, μ_θ , à partir de la formule:

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

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, μ_θ 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:

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

où:

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

et

δ : écart angulaire entre les deux diagrammes

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

Ω : 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, η , comme à l'Etape 2 du § 4.1

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

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

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 lorsque aucune protection n'est utilisée (voir l'Etape 3 du § 5.1).

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

$$P_d = \left(P_{ds}^{0,75} + P_{dns}^{0,75} \right)^{4/3} \quad (82)$$

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 η comme à l'Etape 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 (29).

Etape 4: Calculer le carré du coefficient équivalent de corrélation des évanouissements non sélectifs, k_{ns} , 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 (Etape 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 lorsque aucune protection n'est utilisée, donnée par la formule (64).

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

7 Prévion 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 § 2.3.6, 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, 1×10^{-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 selon les méthodes indiquées à l'Annexe 2.

8 Aspects de propagation de la mise en service

Si l'on effectue des essais lors de la mise en service d'un système conformément aux dispositions de la Recommandation UIT-R F.1330, il est souhaitable d'éviter les périodes de l'année et les heures du jour pendant lesquelles une propagation par trajets multiples a le plus de chances de se produire.

Des études menées dans des zones à climat tempéré ont montré que les effets de la propagation par trajets multiples ont le moins de chances de se produire en hiver et au cours des deux mois qui précèdent cette saison. Pour les essais qui doivent obligatoirement être effectués en été, la période du jour pendant laquelle, selon les observations effectuées, ces effets ont le moins de chances de se produire, est la tranche horaire de 10 h à 14 h heure locale. On peut raisonnablement supposer que ceci vaut également pour les autres saisons.

APPENDICE 1

À 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 le plus défavorable moyen 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 $|\varepsilon_p|$ à partir de la formule (6).

Etape 4: Utiliser les coordonnées (p_1, A_1) du «premier point de la queue», ainsi que les valeurs de $d, f, |\varepsilon_p|$ dans la formule (7) ou (8) selon le cas, 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 $\log K$.

ANNEXE 2

Prévision des caractéristiques d'erreur et de la disponibilité des liaisons radioélectriques à hiérarchie numérique synchrone en visibilité directe

1 Introduction

Les réseaux à hiérarchie numérique synchrone (SDH, *synchronous digital hierarchy*) ou réseaux optiques synchrones (SONET, *synchronous optical network*) acceptent actuellement des systèmes de liaisons radioélectriques dotés de capacités de transfert synchrone allant de 51 Mbit/s (STM-0) à

622 Mbit/s (STM-4). Les Recommandations et Normes internationales définissent des objectifs en matière de caractéristiques d'erreur et de disponibilité pour les réseaux SDH. Ces objectifs ne dépendent pas des moyens utilisés et doivent encore être respectés lorsque le réseau comprend des systèmes radioélectriques.

Les méthodes de prévision décrites dans la présente Annexe sont fondées sur une relation établie de manière théorique entre le taux d'erreur binaire (BER, *bit error rate*) et les nouveaux paramètres SDH fondés sur les blocs erronés (EB, *errored block*). Ces méthodes prennent en compte les caractéristiques des systèmes telles que les rafales d'erreurs ainsi que les paramètres nécessaires pour prévoir le temps d'interruption en fonction du taux BER.

2 Objectifs relatifs aux caractéristiques d'erreur et à la disponibilité

Les Recommandations UIT-T G.826 et UIT-T G.827 énoncent les prescriptions relatives aux caractéristiques d'erreur et à la disponibilité, respectivement. Etant donné qu'elles spécifient les objectifs à atteindre de bout en bout, d'autres Recommandations sont nécessaires lorsqu'il s'agit des liaisons radioélectriques mêmes. Pour répartir les tolérances des différents conduits caractérisés par des longueurs de bonds effectifs, des fréquences radioélectriques de fonctionnement effectives, etc., on a établi des Recommandations additionnelles traitant de la partie radioélectrique d'un réseau SDH.

2.1 Paramètres relatifs aux caractéristiques d'erreur et à la disponibilité

La Recommandation UIT-T G.826 définit un ensemble d'événements liés aux caractéristiques d'erreur basées sur la notion de bloc et des paramètres destinés au contrôle en service des caractéristiques d'erreur d'un conduit SDH (voir la Note 1). Un EB est un bloc dans lequel un ou plusieurs bits sont erronés. Une seconde erronée (ES, *errored second*) survient s'il existe un ou plusieurs blocs erronés ou au moins un défaut comme une perte de pointeur (LoP, *loss of pointer*). Une seconde gravement erronée (SES, *severely errored second*) survient s'il existe 30% ou plus de blocs erronés ou un défaut. Un bloc erroné résiduel (BBE, *background block error*) est un bloc erroné ne survenant pas dans une seconde SES. Les paramètres définis sont le taux de secondes gravement erronées (SESR, *severely errored second ratio*), le taux de blocs erronés résiduels (BBER, *background block error ratio*) et le taux de secondes erronées (ESR, *errored second ratio*).

NOTE 1 – Un conduit SDH est un chemin qui transporte une capacité utile SDH et un préfixe associé à travers le réseau de transport à couches entre les équipements terminaux. Un conduit numérique peut être bidirectionnel ou unidirectionnel et peut comprendre à la fois des portions appartenant au client et des portions appartenant à l'opérateur de réseau (pour de plus amples renseignements, se reporter aux Recommandations UIT-T G.803, UIT-T G.805, UIT-T G.828).

La définition de la taille de bloc et des événements liés aux caractéristiques d'erreur pour la section multiplex (MS, *multiplex section*) en mode SDH et la section de régénération (RS, *regenerator section*) est présentée dans la Recommandation UIT-T G.829. Les paramètres et objectifs relatifs aux caractéristiques d'erreur pour les sections MS et RS en mode SDH dans des bonds de faisceau hertzien numérique sont indiqués dans les Recommandations UIT-R de la Série F.

Chaque direction d'un conduit peut se trouver dans l'un des états suivants: temps de disponibilité et temps d'indisponibilité. Les critères qui déterminent la transition entre les deux états sont indiqués ci-après. Une période d'indisponibilité commence au début d'événements de 10 s gravement erronées consécutives. Ces 10 s font partie du temps d'indisponibilité. Une nouvelle période de disponibilité commence au début d'événements de 10 s consécutives ne comportant pas de seconde gravement erronée. Ces 10 s font partie du temps de disponibilité. Un conduit est disponible si, et uniquement si, les deux directions sont disponibles.

Les paramètres de disponibilité définis sont le taux de disponibilité (*AR*, *availability ratio*) et la durée moyenne entre interruptions de conduit numérique, *Mo*. Le complément à 1 du taux *AR* est le taux d'indisponibilité (*UR*, *unavailability ratio*). Ainsi, $AR + UR = 1$. L'inverse de *Mo* est défini comme étant la fréquence d'interruption (*OI*, *outage intensity*). Ainsi, $OI = 1/Mo$. *OI* représente le nombre de périodes d'indisponibilité par an.

NOTE 2 – Le seuil de 30% de blocs erronés est défini pour le conduit SDH dans la Recommandation UIT-T G.826, tandis que la valeur de seuil des sections MS et RS en mode SDH est spécifiée dans la Recommandation UIT-T G.829.

2.2 Objectifs relatifs aux faisceaux hertziens numériques

Les objectifs relatifs aux caractéristiques d'erreur indiqués pour les conduits numériques à débit égal ou supérieur au débit primaire (2,048 ou 1,544 Mbit/s) sont différents pour les portions nationales et internationales. Les objectifs énoncés doivent être atteints quel que soit le mois. L'UIT-R a adopté des objectifs tant pour les conduits nationaux (voir la Recommandation UIT-R F.1189) que pour les conduits internationaux (voir la Recommandation UIT-R F.1092). La portion nationale se subdivise en trois sections, grande distance, courte distance et réseau d'accès. L'allocation des objectifs relatifs aux caractéristiques d'erreur pour les sections courte distance et réseau d'accès doit tenir compte d'une allocation fixe de l'ordre de 7,5% à 8,5% des objectifs de bout en bout. L'allocation des objectifs pour la section longue distance doit prendre en compte une allocation dépendant de la distance (par tranche de 500 km) et une allocation fixe de l'ordre de 1% à 2% des objectifs de bout en bout. Pour définir ces objectifs en fonction de liaisons hertziennes numériques composées d'un ou plusieurs bonds, il conviendra d'utiliser respectivement les Recommandations UIT-R F.1397 et F.1491 pour les parties nationale et internationale.

Les objectifs de disponibilité sont définis dans la Recommandation UIT-T G.827. Cela étant, l'UIT-R applique comme objectif une période de disponibilité de 99,7% par an pour un conduit de référence de 2 500 km (voir la Recommandation UIT-R F.557). La période d'indisponibilité de 0,3% se divise de manière linéaire (par km) sur les différentes liaisons de qualité élevée (voir la Recommandation UIT-R F.695) couvrant 280 à 2 500 km, avec 0,033% pour les 280 km restants. Pour les liaisons hertziennes numériques composées d'un ou plusieurs bonds, les objectifs de disponibilité pour une liaison qui fait partie d'un conduit SDH à débit égal ou supérieur au débit primaire sont définis respectivement dans les Recommandations UIT-R F.1492 et F.1493 pour les parties nationale et internationale.

3 Prévision des caractéristiques d'erreur et de la disponibilité

On évalue la relation entre les paramètres relatifs aux caractéristiques d'erreur et le BER au moyen de la distribution aléatoire (Poisson) et de la distribution des rafales d'erreurs (Neyman-A). Les systèmes de radiotransmission modernes, qui mettent en œuvre des systèmes de modulation complexes, des codes de correction d'erreur, des égaliseurs, etc., produisent généralement des groupes ou des rafales d'erreurs (voir la Note 1). Pour la modulation de haut niveau (par exemple MCT-128 (modulation à codage en treillis)), les valeurs types sont de 10 à 20 erreurs par rafale.

NOTE 1 – Une rafale d'erreurs se définit comme étant une suite d'erreurs qui commence et se termine par un bit erroné tel que le laps de temps entre deux erreurs est inférieur à la mémoire du système (par exemple, la longueur de contrainte du code convolutif, la taille de code pour le code de bloc, etc.).

Les nouvelles méthodes de prévision SDH sont fondées sur des hypothèses théoriques relatives au taux *TEB*, qui est le paramètre fondamental utilisé dans les méthodes de prévision existantes, et aux événements de caractéristiques d'erreur *ES*, *SES* et *BBE*. Étant fondées sur le *BER*, les méthodes

visent automatiquement la propagation par trajets multiples et l'affaiblissement dû à la pluie. On trouvera dans les paragraphes suivants des informations de base ainsi que des procédures de calcul décrites étape par étape.

Les méthodes de prévision pour SDH peuvent également être utilisées pour la hiérarchie numérique plésiosynchrone (PDH, *plesiosynchronous digital hierarchy*) avec les choix suivants:

- utiliser la valeur de BER_{SES} la plus proche du débit de transmission (Mbit/s), par exemple VC-12 pour un signal radioélectrique PDH de 2 Mbit/s;
- utiliser la valeur de BER_{SES} figurant au Tableau 2 (le BER_{SES} est en cours d'étude pour PDH, mais seules des différences mineures sont prévues).

3.1 Prévision du taux SESR

La procédure de prévision du taux SESR repose sur la relation entre le taux SES et le BER, les méthodes de prévision des interruptions définies par un taux BER spécifié étant indiquées à l'Annexe 1. En règle générale, la prévision du taux SESR est donnée par l'équation suivante:

$$SESR = \int_{BER_A}^{BER_B} f_{SES}(x) g_{BER}(x) dx \quad (89)$$

où:

- $f_{SES}(x)$: relation entre le paramètre SES et le BER
- $g_{BER}(x)$: fonction de densité de probabilité (PDF, *probability density function*) du BER_A et BER_B : limites d'intégration (valeurs types de 1×10^{-9} et 1×10^{-3}).

3.1.1 Prévision du taux SESR dû aux effets de la propagation par trajets multiples

Le paramètre SESR est donné par l'équation (89), dans laquelle le deuxième terme est la fonction F du taux BER. En cas de propagation par trajets multiples, le taux BER est strictement lié à la probabilité d'interruption P_t , évaluée selon les méthodes énoncées à l'Annexe 1. Il est possible de déterminer la probabilité d'interruption P_t par rapport au taux BER selon les méthodes appropriées au système de transmission considéré (voir, par exemple, la Fig. 7). La fonction g_{BER} est déterminée à partir de la Fig. 7, c'est-à-dire que $g_{BER} = dP_t/dBER$.

En règle générale, on n'obtient les valeurs de la probabilité d'interruption que pour quelques valeurs du taux BER lorsque l'on connaît la signature de l'équipement et la valeur de seuil. Si un jeu étendu de valeurs BER est disponible, on peut obtenir une courbe plus précise.

L'évaluation du taux SESR se fait en deux étapes, l'une servant à déterminer le nombre de secondes SES dues aux blocs erronés et l'autre servant à calculer la partie généralement insignifiante correspondant à la perte de pointeur LoP.

Une approximation de la courbe du taux SES dû aux blocs erronés est possible au moyen d'une fonction échelon. La valeur BER à laquelle la probabilité d'apparition de secondes SES passe de 0 à 1 est dénommée BER_{SES} :

$$f_{SES}(x) = \begin{cases} 0 & \text{pour } BER < BER_{SES} \\ 1 & \text{pour } BER \geq BER_{SES} \end{cases} \quad (90)$$

La valeur de BER_{SES} normalisée en fonction du nombre moyen d'erreurs par rafale m ($m = 1$ pour la distribution de Poisson) est indiquée au Tableau 2.

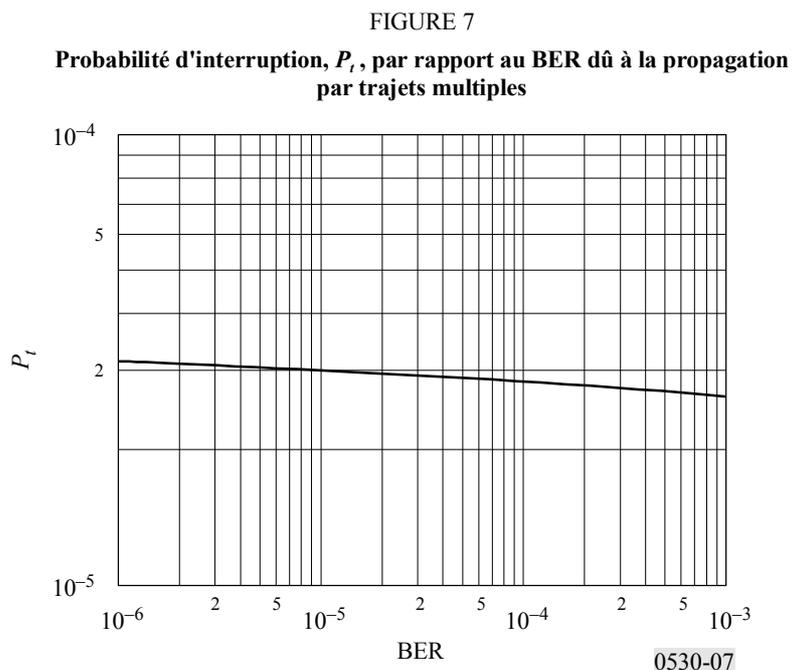


TABLEAU 2

Valeurs de BER_{SES} pour plusieurs conduits SDH et sections MS

Type de conduit	Débit binaire accepté (Mbit/s)	$BER_{SES}^{(1), (2)}$	Nombre de blocs par seconde, $n^{(2)}$	Nombre de bits par bloc, $N_B^{(2)}$
VC-11	1.5	$5,4 \times 10^{-4} \alpha$	2 000	832
VC-12	2	$4,0 \times 10^{-4} \alpha$	2 000	1 120
VC-2	6	$1,3 \times 10^{-4} \alpha$	2 000	3 424
VC-3	34	$6,5 \times 10^{-5} \alpha$	8 000	6 120
VC-4	140	$2,1 \times 10^{-5} \alpha$	8 000	18 792
STM-1	155	$2,3 \times 10^{-5} \alpha$ $1,3 \times 10^{-5} \alpha + 2,2 \times 10^{-4}$	8 000 192 000	19 940 801

(1) $\alpha = 1$ indique une distribution de Poisson des erreurs.

(2) Le nombre de blocs par seconde est défini dans la Recommandation UIT-T G.826 pour le conduit SDH et dans la Recommandation UIT-T G.829 pour les sections SDH. Certains équipements STM-1 pourraient être conçus pour fonctionner à un débit de 8 000 blocs/s (19 940 bits/bloc), mais les valeurs définies dans la Recommandation UIT-T G.829 pour le débit et la longueur des blocs sont respectivement de 192 000 blocs/s et 801 bits/bloc.

Compte tenu de l'équation (90), lorsque les secondes SES sont dues aux blocs erronés, l'équation (89) devient:

$$SESR = \int_{BER_A}^{BER_B} f_{SES}(x) g_{BER}(x) dx = P_t(BER_{SES}) \quad (91)$$

Limite supérieure pour les secondes SES dues à la perte de pointeur LoP

Pour évaluer la limite supérieure $SESR_{LoPu}$, on suppose que la probabilité d'apparition de secondes SES pour des valeurs de BER inférieures à BER_{SES} est une constante. Ainsi,

$$SESR_{LoPu} = P(SES | BER = BER_{SES}) (1 - P_t(BER_{SES})) \quad (92)$$

NOTE 1 – On a établi que la contribution du paramètre LoP était minime et pouvait donc ne pas être prise en compte.

3.1.1.1 Procédure de calcul du nombre de secondes SESR dues à la propagation par trajets multiples (étape par étape)

Etape 1: Calculer la probabilité d'interruption P_{tSES} pour $BER = BER_{SES}$, pour le système approprié, à l'aide des méthodes de prévision des interruptions décrites à l'Annexe 1:

$$SESR = P_{tSES} = P_t(BER_{SES}) \quad (93)$$

BER_{SES} étant indiqué au Tableau 2.

3.1.2 Prévision du taux SESR dû à l'affaiblissement par la pluie

La pluie peut entraîner un important affaiblissement. La plupart du temps, $X\%$, lorsque l'affaiblissement dû à la pluie dépasse le seuil A_{SES} , il se produira une condition d'indisponibilité. Le temps restant $100 - X\% = Y\%$ est considéré comme une période de disponibilité donnant lieu à des secondes SES. La répartition entre la période de disponibilité et la période d'indisponibilité pour toute région climatique doit être déterminée à partir de mesures expérimentales.

Le calcul du taux SESR dû à la pluie consiste à déterminer la marge d'affaiblissement, A_{SES} , de la liaison radioélectrique pour un taux BER, BER_{SES} , toutes les secondes étant des secondes SES. Il est possible ensuite d'évaluer le pourcentage de temps pendant le mois le plus défavorable pendant lequel l'affaiblissement dû à la pluie dépasse cette marge et enfin d'évaluer le pourcentage de temps annuel correspondant. La valeur du taux SESR dû à la pluie sera de $Y\%$ de cette probabilité.

3.1.2.1 Procédure de calcul du taux SESR dû à l'affaiblissement par la pluie (étape par étape)

On trouvera ci-après, indiquée étape par étape, une procédure d'évaluation du taux SESR dû à la pluie. Les paramètres d'entrée sont les suivants: fréquence, longueur de bond, polarisation, zone de pluie, puissance à l'émission, gain de l'antenne d'émission, gain de l'antenne de réception, relation entre la puissance reçue et le BER, type de conduit SDH et longueur des rafales d'erreurs.

Etape 1: Calculer l'affaiblissement dû à la pluie dépassé pour 0,01% de temps, $A_{0,01}$, selon la méthode décrite au § 2.4.1 de l'Annexe 1.

Etape 2: Calculer la puissance nominale reçue sans affaiblissement dû à la pluie $P_{RXnominal}$.

Etape 3: A partir de la relation entre la puissance reçue et le BER (généralement obtenue auprès des équipementiers), déterminer la valeur de A_{SES} , A_{SES} étant la marge d'affaiblissement de la liaison radioélectrique pour $BER = BER_{SES}$ (voir le Tableau 2).

Etape 4: Calculer le pourcentage de temps annuel, p_{aSES} , pendant lequel l'affaiblissement dû à la pluie est supérieur à A_{SES} selon la méthode indiquée au § 2.4.1 de l'Annexe 1.

Etape 5: Convertir le pourcentage de temps annuel, p_{aSES} , en pourcentage de temps pendant le mois le plus défavorable p_{wSES} selon la méthode indiquée dans la Recommandation UIT-R P.841.

Etape 6: Calculer le taux SESR comme suit:

$$SESR = Y(\%) P_{wSES} \quad (94)$$

où P_{wSES} est la probabilité de mois le plus défavorable ($P_{wSES} = p_{wSES}/100$).

NOTE 1 – La valeur de X est à l'étude; la valeur $Y = 0\%$ est proposée pour le moment.

3.2 Prévion du taux BTEB

Le taux BBER dû à la propagation par trajets multiples et dû à la pluie est évalué comme suit:

$$BBER = \int_{BER_A}^{BER_B} f_{BBER}(x) g_{BER}(x) dx \quad (95)$$

où:

$f_{BBER}(x)$: relation entre les taux BBE et BER,

$g_{BER}(x)$: fonction PDF du taux BER,

BER_A et BER_B : limites d'intégration (valeurs types de 1×10^{-12} et 1×10^{-3}).

3.2.1 Prévion du taux BBER dû à la propagation par trajets multiples

Deux méthodes sont possibles. La première méthode est une méthode complète fondée sur la solution analytique de l'intégrale qui figure dans l'équation (95), $g_{BER}(x)$ étant obtenu à partir du modèle de prévision des interruptions (voir la Fig. 7) et $f_{BBER}(x)$ étant la relation théorique entre les taux BBE et BER. La deuxième méthode est une méthode simplifiée fondée sur une approximation de $f_{BBER}(x)$ et de $g_{BER}(x)$.

3.2.1.1 Procédure de calcul du taux BBER dû à la propagation par trajets multiples (étape par étape)

On trouvera dans ce paragraphe, indiquée étape par étape, une procédure fondée sur le modèle de prévision simplifié.

Etape 1: Calculer la probabilité d'interruption, P_{tR} , pour le BER résiduel (RBER) (généralement dans la plage comprise entre 1×10^{-10} et 1×10^{-13} pour des débits binaires allant de 2 à 155 Mbit/s respectivement) selon les méthodes de prévision des interruptions décrites à l'Annexe 1 pour le système approprié:

$$P_{tR} = P_t(RBER) \quad (96)$$

Etape 2: Calculer la probabilité d'interruption à $BER = BER_{SES}$ comme indiqué à l'Etape 1:

$$P_{tSES} = P_t(BER_{SES}) \quad (97)$$

TEB_{SES} étant indiqué au Tableau 2.

Etape 3: Calculer le taux SESR comme indiqué à l'Etape 1 pour la propagation par trajets multiples (voir le § 3.1.1.1):

$$SESR = P_{tSES} = P_t(BER_{SES}) \quad (98)$$

Etape 4: Calculer le taux BBER comme suit:

$$BBER = SESR \frac{\alpha_1}{2,8 \alpha_2 (m - 1)} + \frac{N_B RBER}{\alpha_3} \quad (99)$$

où:

$\alpha_1 =$ 10 à 30 est le nombre d'erreurs par rafale pour un BER compris entre 1×10^{-3} et BER_{SES}

$\alpha_2 =$ 1 à 10 est le nombre d'erreurs par rafale pour un BER compris entre BER_{SES} et RBER

$\alpha_3 =$ 1 est le nombre d'erreurs par rafale pour un BER inférieur à RBER

N_B : nombre de bits par bloc (voir le Tableau 2)

m : pente de la courbe de distribution BER sur une échelle logarithmique pour un taux BER compris entre BER_{SES} et RBER, donnée par l'équation suivante:

$$m = \left| \frac{\log_{10}(RBER) - \log_{10}(BER_{SES})}{\log_{10}(P_{IR}) - \log_{10}(P_{iSES})} \right| \quad (100)$$

3.2.2 Prévision du taux BBER dû à l'affaiblissement par la pluie

Le modèle de prévision pour le taux BBER dû à la pluie est fondé sur la relation entre le modèle d'affaiblissement dû à la pluie de l'UIT-R et le BER en fonction du rapport C/N du système de transmission considéré.

3.2.2.1 Procédure de calcul du taux BBER dû à l'affaiblissement par la pluie (étape par étape)

Les paramètres d'entrée sont les suivants: fréquence, longueur de bond, polarisation, zone de pluie, puissance à l'émission, gain de l'antenne d'émission, gain de l'antenne de réception, relation entre la puissance reçue et le BER, type de conduit SDH et longueur des rafales d'erreurs.

Etape 1: Calculer l'affaiblissement dû à la pluie dépassé pour 0,01% de temps, $A_{0,01}$, selon la méthode décrite au § 2.4.1 de l'Annexe 1.

Etape 2: Calculer la puissance nominale reçue sans affaiblissement dû à la pluie $P_{RXnominal}$.

Etape 3: A partir de la relation entre la puissance reçue et le BER (généralement obtenue auprès des équipementiers), déterminer la valeur de A_{SES} , A_{SES} étant la marge d'affaiblissement de la liaison radioélectrique pour $BER = BER_{SES}$ (voir le Tableau 2).

Etape 4: Calculer le pourcentage de temps annuel p_{aSES} pendant lequel l'affaiblissement dû à la pluie est supérieur à A_{SES} selon la méthode indiquée au § 2.4.1 de l'Annexe 1.

Etape 5: Convertir le pourcentage de temps annuel p_{aSES} en pourcentage de temps pendant le mois le plus défavorable p_{wSES} selon la méthode indiquée dans la Recommandation UIT-R P.841.

Etape 6: A partir de la relation entre la puissance reçue et le BER (généralement obtenue auprès des équipementiers), déterminer la valeur de A_R , A_R étant la marge d'affaiblissement de la liaison radioélectrique pour le taux RBER).

Etape 7: Calculer le pourcentage de temps annuel p_{aR} pendant lequel l'affaiblissement dû à la pluie est supérieur à A_R selon la méthode indiquée au § 2.4.1 de l'Annexe 1.

Etape 8: Convertir le pourcentage de temps annuel p_{aR} en pourcentage de temps pendant le mois le plus défavorable p_{wR} selon la méthode indiquée dans la Recommandation UIT-R P.841.

Etape 9: Convertir les pourcentages de temps pendant le mois le plus défavorable p_{wSES} et p_{wR} en valeurs de probabilité correspondantes P_{wSES} et P_{wR} , où: ($P_{wSES} = p_{wSES} / 100$ et $P_{wR} = p_{wR} / 100$).

Etape 10: Calculer le taux BBER comme suit:

$$BBER = SESR \frac{\alpha_1}{2,8 \alpha_2 (m - 1)} + \frac{N_B RBER}{\alpha_3} \quad (101)$$

où:

SESR est obtenu au moyen de l'équation (94),

et

$\alpha_1 =$ 1 à 30 est le nombre d'erreurs par rafale pour un BER compris entre 1×10^{-3} et BER_{SES}

$\alpha_2 =$ 1 à 20 est le nombre d'erreurs par rafale pour un BER compris entre BER_{SES} et BER, où $\alpha_1/\alpha_2 \leq 2$

$\alpha_3 =$ 1 est le nombre d'erreurs par rafale pour un BER égal ou inférieur au BER résiduel

N_B : nombre de bits/bloc (voir le Tableau 2)

m : pente de la courbe de distribution BER sur une échelle logarithmique pour un BER compris entre BER_{SES} et RBER, donnée par l'équation suivante:

$$m = \left| \frac{\log_{10} (RBER) - \log_{10} (BER_{SES})}{\log_{10} (P_{wR}) - \log_{10} (P_{wSES})} \right| \quad (102)$$

3.3 Prévision du taux ESR

Le taux ESR dû à la propagation par trajets multiples et à la pluie est évalué comme suit:

$$ESR = \int_{BER_A}^{BER_B} f_{ESR}(x) g_{BER}(x) dx \quad (103)$$

où:

$f_{ESR}(x)$: relation entre ES et BER,

$g_{BER}(x)$: fonction PDF du BER,

BER_A et BER_B : limites d'intégration (valeurs types de 1×10^{-12} et 1×10^{-3}).

3.3.1 Prévision du ESR dû à la propagation par trajets multiples

La méthode de prévision du taux ESR est fondée sur une approximation de l'intégrale qui figure dans l'équation (103).

3.3.1.1 Procédure de calcul du taux ERS dû aux trajets multiples (étape par étape)

On trouvera ci-après une procédure, indiquée étape par étape, d'évaluation du taux ESR dû à des trajets multiples.

Etape 1: Calculer la probabilité d'interruption, P_{tR} , pour le taux RBER selon les méthodes de prévision des interruptions décrites à l'Annexe 1 pour le système approprié:

$$P_{tR} = P_t(RBER) \quad (104)$$

Etape 2: Calculer la probabilité d'interruption à $BER = BER_{SES}$ comme dans l'Etape 1:

$$P_{tSES} = P_t(BER_{SES}) \quad (105)$$

BER_{SES} étant indiqué au Tableau 2.

Etape 3: Calculer le taux SESR comme suit:

$$SESR = P_{tSES} = P_t(BER_{SES}) \quad (106)$$

Etape 4: Calculer le taux ESR comme suit:

$$ESR = SESR \sqrt[m]{n} + \frac{n N_B RBER}{\alpha_3} \quad (107)$$

où:

$\alpha_3 = 1$ est le nombre d'erreurs par rafale pour un BER inférieur à RBER

N_B : nombre de bits/bloc (voir le Tableau 2)

n : nombre de blocs/s (voir le Tableau 2)

m : pente de la courbe de distribution BER sur une échelle logarithmique pour un BER compris entre BER_{SES} et RBER, donnée par l'équation suivante:

$$m = \left| \frac{\log_{10}(RBER) - \log_{10}(BER_{SES})}{\log_{10}(P_{tR}) - \log_{10}(P_{tSES})} \right| \quad (108)$$

3.3.2 Prévision du taux ESR dû à l'affaiblissement par la pluie

Le modèle de prévision pour le taux ESR dû à la pluie est fondé sur la relation entre le modèle d'affaiblissement dû à la pluie de l'UIT-R et le BER en fonction du rapport C/N du système de transmission considéré.

3.3.2.1 Procédure de calcul du taux ESR dû à la pluie (étape par étape)

Les paramètres d'entrée sont les suivants: fréquence, longueur de bond, polarisation, zone de pluie, puissance à l'émission, gain de l'antenne d'émission, gain de l'antenne de réception, relation entre la puissance reçue et le BER, type de conduit SDH et longueur des rafales d'erreurs.

Etape 1: Calculer l'affaiblissement dû à la pluie dépassé pour 0,01% de temps $A_{0,01}$ selon la méthode décrite à l'Annexe 1.

Etape 2: Calculer la puissance nominale reçue sans affaiblissement dû à la pluie $P_{RXnominal}$.

Etape 3: A partir de la relation entre la puissance reçue et le BER (généralement obtenue auprès des équipementiers), déterminer la valeur de A_{SES} , A_{SES} étant la marge d'affaiblissement de la liaison radioélectrique pour $BER = BER_{SES}$ (voir le Tableau 2).

Etape 4: Calculer le pourcentage de temps annuel, p_{aSES} , pendant lequel l'affaiblissement dû à la pluie est supérieur à A_{SES} comme indiqué à l'Annexe 1.

Etape 5: Convertir le pourcentage de temps annuel, p_{aSES} , en pourcentage de temps pendant le mois le plus défavorable, p_{wSES} , selon la méthode indiquée dans la Recommandation UIT-R P.841.

Etape 6: A partir de la relation entre la puissance reçue et le BER (généralement obtenue auprès des équipementiers), déterminer la valeur de A_R , A_R étant la marge d'affaiblissement de la liaison radioélectrique pour le taux RBER).

Etape 7: Calculer le pourcentage de temps annuel, p_{aR} , pendant lequel l'affaiblissement dû à la pluie est supérieur à A_R comme indiqué à l'Annexe 1.

Etape 8: Convertir le pourcentage de temps annuel, p_{aR} , en pourcentage de temps pendant le mois le plus défavorable, p_{wR} , selon la méthode indiquée dans la Recommandation UIT-R P.841.

Etape 9: Convertir les pourcentages de temps pendant le mois le plus défavorable p_{wSES} et p_{wR} en valeurs de probabilité correspondantes P_{wSES} et P_{wR} de sorte que:

$$P_{wSES} = p_{wSES} / 100 \text{ et } P_{wR} = p_{wR} / 100$$

Etape 10: Calculer ESR comme suit:

$$ESR = SESR \sqrt[m]{n} + \frac{n N_B RBER}{\alpha_3} \quad (109)$$

où:

Le taux SESR est obtenu au moyen de l'équation (94), et

$\alpha_3 = 1$ est le nombre d'erreurs par rafale pour un BER inférieur au taux RBER

N_B : nombre de bits/bloc (voir le Tableau 2)

n : nombre de blocs/s (voir le Tableau 2)

m : pente de la courbe de distribution BER sur une échelle logarithmique pour un BER compris entre BER_{SES} et RBER, donnée par l'équation suivante:

$$m = \left| \frac{\log_{10} (RBER) - \log_{10} (BER_{SES})}{\log_{10} (P_{wR}) - \log_{10} (P_{wSES})} \right| \quad (110)$$

3.4 Prévision de l'indisponibilité due aux effets de la propagation

Selon la définition en vigueur, l'indisponibilité est due à de longues périodes SES. Un système radioélectrique se trouve à l'état de disponibilité ou d'indisponibilité. Si un système se trouve à l'état de disponibilité et qu'une période SES supérieure à 10 s consécutives survient, le système passera à l'état d'indisponibilité et la période SES devient une période d'indisponibilité. Si le système se trouve à l'état d'indisponibilité, il faut, pour qu'il passe à l'état de disponibilité, qu'il s'écoule une période de 10 s consécutives sans secondes SES. Pour le moment, on suppose que la période d'indisponibilité est due uniquement aux évanouissements causés par la pluie. Il est donc plus aisé de déterminer l'indisponibilité due à l'affaiblissement par la pluie selon la méthode de calcul du taux SESR dû à la pluie (voir le § 3.1.2 et 3.1.2.1).

Si $Y = 0\%$ (voir la Note 1 du § 3.1.2.1), le taux d'indisponibilité (UR), $UR = P_{aSES}$ pour l'affaiblissement dû à la pluie, où $P_{aSES} = p_{aSES} / 100$ (voir l'étape 4 du § 3.1.2.1).

Il est bien connu que l'évanouissement dû aux trajets multiples peut contribuer à des événements d'indisponibilité. Toutefois, à l'heure actuelle, aucune méthode acceptée de prévision d'indisponibilité due à la propagation par trajets multiples, ou autres effets dus au temps clair, n'existe.