

Recommandation UIT-R P.530-19

(09/2025)

Série P: Propagation des ondes radioélectriques

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

Avant-propos

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

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

Politique en matière de droits de propriété intellectuelle (IPR)

La politique de l'UIT-R en matière de droits de propriété intellectuelle est décrite dans la «Politique commune de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI en matière de brevets», dont il est question dans la Résolution UIT-R 1. Les formulaires que les titulaires de brevets doivent utiliser pour soumettre les déclarations de brevet et d'octroi de licence sont accessibles à l'adresse <https://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>, où l'on trouvera également les Lignes directrices pour la mise en œuvre de la politique commune en matière de brevets de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI et la base de données en matière de brevets de l'UIT-R.

Séries des Recommandations UIT-R

(Également disponible en ligne: <https://www.itu.int/publ/R-REC/en>)

| Séries | Titre |
|------------|--|
| BO | Diffusion par satellite |
| BR | Enregistrement pour la production, l'archivage et la diffusion; films pour la télévision |
| BS | Service de radiodiffusion sonore |
| BT | Service de radiodiffusion télévisuelle |
| F | Service fixe |
| M | Services mobile, de radiorepérage et d'amateur y compris les services par satellite associés |
| P | Propagation des ondes radioélectriques |
| RA | Radio astronomie |
| RS | Systèmes de télédétection |
| S | Service fixe par satellite |
| SA | Applications spatiales et météorologie |
| SF | Partage des fréquences et coordination entre les systèmes du service fixe par satellite et du service fixe |
| SM | Gestion du spectre |
| SNG | Reportage d'actualités par satellite |
| TF | Émissions de fréquences étalon et de signaux horaires |
| V | Vocabulaire et sujets associés |

Note: Cette Recommandation UIT-R a été approuvée en anglais aux termes de la procédure détaillée dans la Résolution UIT-R 1.

Publication électronique
Genève, 2025

© UIT 2025

Tous droits réservés. Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite, par quelque procédé que ce soit, sans l'accord écrit préalable de l'UIT.

RECOMMANDATION UIT-R P.530-19

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

(Question UIT-R 204-6/3)

(1978-1982-1986-1990-1992-1994-1995-1997-1999-2001-2005-2007-2009-2012-2013-2015-2017-2021-2025)

Domaine d'application

La présente Recommandation contient des méthodes de prévision des effets de propagation dont il convient de tenir compte pour concevoir des liaisons numériques fixes en visibilité directe, à la fois par temps clair et par temps de pluie. Elle contient aussi des indications sur la conception des liaisons sous la forme de procédures claires en plusieurs étapes, des techniques de limitation des brouillages étant utilisées afin de minimiser les dégradations de la propagation. La prévision finale des interruptions sert de base à d'autres Recommandations relatives aux caractéristiques d'erreur et à la disponibilité.

Mots clés

Évanouissements, renforcements, amélioration de la diversité, interférences de polarisation croisée

Recommandations et Rapports connexes de l'UIT

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

Recommandation UIT-R P.452 – Méthode de prévision pour évaluer les brouillages entre stations situées à la surface de la Terre à des fréquences supérieures à 100 MHz environ

Recommandation UIT-R P.453 – Indice de réfraction radioélectrique: formules et données de réfractivité

Recommandation UIT-R P.525 – Calcul de la propagation en espace libre

Recommandation UIT-R P.526 – Propagation par diffraction

Recommandation UIT-R P.527 – Caractéristiques électriques du sol

Recommandation UIT-R P.581 – Notion de «mois le plus défavorable»

Recommandation UIT-R P.619 – Données sur la propagation nécessaires à l'évaluation des brouillages entre des stations dans l'espace et des stations situées à la surface de la Terre

Recommandation UIT-R P.676 – Affaiblissement dû aux gaz de l'atmosphère et effets associés

Recommandation UIT-R P.836 – Vapeur d'eau: concentration à la surface de la Terre et contenu total d'une colonne d'air

Recommandation UIT-R P.837 – Caractéristiques des précipitations pour la modélisation de la propagation

Recommandation UIT-R P.838 – Modèle d'affaiblissement linéique dû à la pluie destiné aux méthodes de prévision

Recommandation UIT-R P.839 – Modèle d'altitude de pluie pour les méthodes de prévision

Recommandation UIT-R P.840 – Affaiblissement dû aux nuages et au brouillard

Recommandation UIT-R P.841 – Conversion des statistiques annuelles en statistiques pour le mois le plus défavorable

Recommandation UIT-R P.1057 – Modélisation de la propagation des ondes radioélectriques: distributions de probabilité

Recommandation UIT-R P.1144 – Guide pour l'application des méthodes de prévision de la propagation de la Commission d'études 3 des radiocommunications

Recommandation UIT-R P.1410 – Données de propagation et méthodes de prévision nécessaires pour la conception de systèmes d'accès radioélectrique de Terre à large bande fonctionnant entre 3 et 60 GHz

NOTE – Il convient d'utiliser la version révisée ou l'édition la plus récente de la Recommandation.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a)* que, pour planifier 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

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

Annexe

TABLE DES MATIÈRES

| | <i>Page</i> |
|---|-------------|
| 1 Introduction | 3 |
| 1.1 Produits numériques | 4 |
| 2 Environnements physiques et définition des types de cellule | 4 |
| 2.1 Affaiblissement dû aux gaz de l'atmosphère | 5 |
| 2.2 Évanouissements par diffraction..... | 5 |
| 2.3 Évanouissements et renforcements dus à la propagation par trajets multiples et mécanismes connexes | 9 |
| 2.4 Affaiblissement dû aux hydrométéores | 15 |
| 3 Variations de l'angle d'arrivée et de l'angle de départ..... | 34 |
| 4 Réduction de la discrimination de la XPD | 35 |
| 4.1 Prévision des interruptions de la XPD dues aux effets par temps clair | 35 |

| | | |
|-----|---|----|
| 4.2 | Prévision des interruptions de la XPD dues aux effets pendant les précipitations..... | 36 |
| 5 | Distorsion due aux effets de la propagation | 37 |
| 5.1 | Prévision des interruptions dans les systèmes numériques non protégés | 38 |
| 6 | Méthodes propres à atténuer les effets de la propagation par trajets multiples | 39 |
| 6.1 | Techniques sans diversité | 39 |
| 6.2 | Techniques avec diversité..... | 51 |
| 7 | Prévision de la probabilité totale d'interruption..... | 60 |
| 8 | Aspects de propagation de la mise en service | 61 |
| | Pièce jointe à l'Annexe – Méthode de détermination du facteur géoclimatique, K , à partir de données mesurées d'évanouissement sur des trajets au-dessus des terres | 61 |

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.

À 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).

1.1 Produits numériques

Il convient d'utiliser uniquement les versions fichier fournies avec la présente Recommandation. Ils en font partie intégrante. Le Tableau 1 donne des précisions concernant les produits numériques utilisés dans la méthode. L'interpolation de LogK.csv et dN75.csv pour les coordonnées du centre du trajet est effectuée par interpolation bilinéaire, décrite dans la Recommandation UIT-R P.1144. Les fichiers LatitudeQuarterDegree.csv et LongitudeQuarterDegree.csv sont fournis pour faciliter l'interpolation (voir [R-REC-P.530-19-202509-I!!ZIP-E.zip](#)).

TABLEAU 1
Produits numériques

| Nom du fichier | Réf. | Origine | Latitude (lignes) | | | Longitude (colonnes) | | |
|----------------------------|---------|---------|-------------------|----------------------|-------------------|----------------------|----------------------|--------------------|
| | | | 1ère rangée (°N) | Espace-ment (degrés) | Nom-bre de lignes | 1ère colonne (°E) | Espace-ment (degrés) | Nombre de colonnes |
| LogK.csv | § 2.3.1 | P.530 | 90 | 0,25 | 721 | 180 | 0,25 | 1 441 |
| dN75.csv | § 2.3.1 | P.530 | 90 | 0,25 | 721 | 180 | 0,25 | 1 441 |
| LatitudeQuarterDegree.csv | § 2.3.1 | P.530 | 90 | 0,25 | 721 | 180 | 0,25 | 1 441 |
| LongitudeQuarterDegree.csv | § 2.3.1 | P.530 | 90 | 0,25 | 721 | 180 | 0,25 | 1 441 |

2 Environnements physiques et définition des types de cellule

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 Évanouissements 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 sous-réfraction 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 m de l'atmosphère (voir la Recommandation UIT-R P.453 sur les effets de la réfraction). Pour obtenir la valeur effective 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:

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

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)

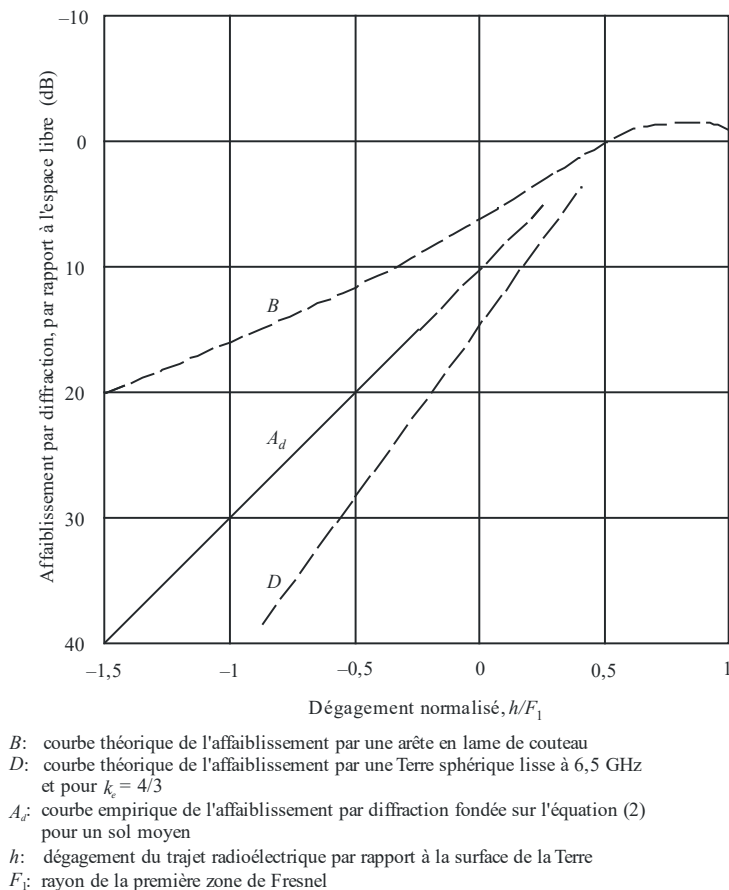
d : longueur du trajet (km)

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



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 par 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

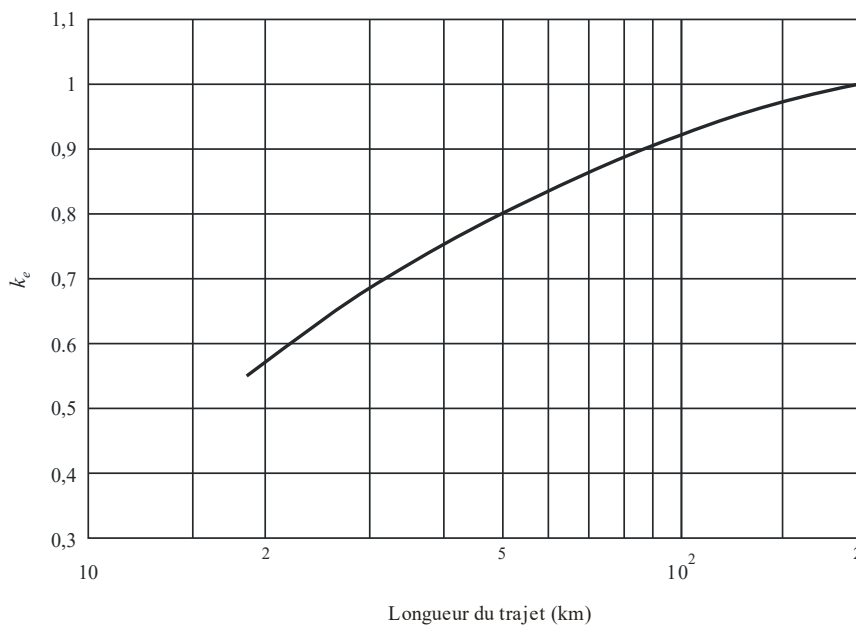
Étape 1: déterminer les hauteurs d'antennes nécessaires pour la valeur médiane appropriée du facteur k ponctuel (voir le § 2.2; en l'absence de données, prendre $k = 4/3$) et le dégagement $1,0 F_1$ pour l'obstacle le plus élevé (climats tempérés et tropicaux);

Étape 2: déduire de la Fig. 2 la valeur de k_e pour la longueur du trajet en question, d , ou au moyen de la formule:

$$k_e = \frac{157}{144 + 2670/d} \quad (4)$$

FIGURE 2

Valeur de k_e dépassée pendant environ 99,9% du mois le plus défavorable (climat tempéré continental)



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

Étape 4: retenir les plus grandes hauteurs d'antenne calculées lors des Étapes 1 et 3 (voir la Note 1).

En cas de doute sur le type de climat, on pourra se conformer à la loi de dégagement la plus pessimiste (voir la Note 1), celle des climats tropicaux, ou à la rigueur à une loi fondée sur une moyenne des dégagements pour les climats tempérés et tropicaux. Pour éviter d'avoir, à des fréquences inférieures à 2 GHz environ, des hauteurs d'antenne excessives, il pourra être nécessaire au cours des Étapes 1 et 3 de multiplier F_1 par des nombres plus petits.

Aux fréquences supérieures à environ 13 GHz, la précision d'estimation de la hauteur de l'obstacle commence à être de l'ordre du rayon de la zone de Fresnel. Il convient d'ajouter cette précision au dégagement susmentionné.

NOTE 1 – Bien que ces règles soient pessimistes du point de vue de l'affaiblissement par diffraction dû à l'évanouissement en conditions de sous-réfraction, il convient de garder présent à l'esprit qu'une minimisation exagérée de l'indisponibilité due à l'affaiblissement par diffraction dans des conditions de sous-réfraction peut aboutir à une plus grande dégradation de la qualité de fonctionnement et de la disponibilité dans des conditions de propagation par trajets multiples. Il n'est actuellement pas possible d'indiquer un critère général de compromis entre ces deux conditions. Parmi les facteurs pertinents entrant en ligne de compte, on peut citer les marges de protection contre les évanouissements du système.

2.2.2.2 Configuration à deux ou trois antennes pour diversité d'espace

Étape 1: Calculer la hauteur de l'antenne la plus haute en utilisant la méthode relative aux configurations d'antenne unique, mentionnée ci-dessus.

Étape 2: Calculer la hauteur de l'antenne la plus basse 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 (voir la Note 1):

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 plus basse de manière à avoir un affaiblissement par diffraction d'environ 6 dB sous des conditions de réfraction normales (c'est-à-dire au milieu du jour; voir le § 8) 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).

Étape 3: Vérifier que l'espacement entre les deux antennes répond aux exigences de la diversité dans le cas d'évanouissements dus à la propagation par trajets multiples (voir le § 6.2.1). Sinon, modifier cet espacement de façon appropriée.

NOTE 1 – Ces gammes de dégagement ont été choisies pour conduire à un affaiblissement par diffraction allant d'environ 3 dB à 6 dB et pour réduire l'occurrence des évanouissements de propagation par trajets multiples de surface (voir le § 6.1.3). Bien sûr, les profils de certains trajets ne permettront pas une telle réduction du dégagement, et d'autres moyens doivent être trouvés pour améliorer les effets des évanouissements par trajets multiples.

En ce qui concerne les trajets pour lesquels on observe une prédominance des évanouissements par trajets multiples de surface à partir d'une ou plusieurs surfaces de réflexion stables (trajets au-dessus de l'eau ou surfaces très planes), il peut être souhaitable de calculer préalablement la hauteur de l'antenne la plus haute en utilisant la méthode indiquée au § 2.2.2.1, avant de calculer l'espacement minimal optimal relatif à l'antenne de diversité afin d'assurer une protection contre la propagation par trajets multiples sur la surface de la Terre (voir le § 6.1.3).

Dans des situations extrêmes (par exemple très longs trajets au-dessus de l'eau), il peut être nécessaire d'utiliser des configurations de diversité à trois antennes. Dans ce cas, le dégagement de l'antenne la moins élevée peut être fondé sur la règle indiquée à l'Étape 2, le dégagement relatif à l'antenne du milieu pouvant être basé sur l'exigence d'un espacement optimal avec l'antenne la plus élevée afin d'améliorer les effets de la propagation par trajets multiples sur la surface de la Terre (voir le § 6.2.1).

2.3 Évanouissements 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

Les évanouissements et renforcements dus à la propagation par trajets multiples ne doivent être calculés que pour les trajets supérieurs à 5 km et peuvent être fixés à zéro pour les trajets plus courts.

Étape 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 la Pièce jointe de l'Annexe).

Si les données mesurées pour K ne sont pas disponibles, estimer le facteur géoclimatique pour le mois le plus défavorable par l'antilog de l'interpolation bilinéaire des quatre points de grille les plus proches du tableau LogK.csv intégré à cette Recommandation, qui est le logarithme en base 10 de $K\%$.

Étape 2: À 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:

$$|\varepsilon_p| = |h_r - h_e| / d \quad (5)$$

où d est la longueur du trajet (km), et le dégagement moyen du terrain sur le trajet h_c (m) au moyen de la formule:

$$h_c = \frac{h_r + h_e}{2} - \frac{d^2}{102} - h_t \quad \text{m} \quad (6)$$

où h_t est l'élévation moyenne du terrain (m au-dessus du niveau de la mer) le long du trajet, à l'exclusion des arbres.

Étape 3: 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:

$$p_w = K d^{3,51} (f^2 + 13)^{0,447} \times 10^{-0,376 \tanh\left(\frac{h_c - 147}{125}\right) - 0,334 |\varepsilon_p|^{0,39} - 0,00027 h_L + 17,85 v_{sr} - A/10} \% \quad (7)$$

où:

f : fréquence (GHz)

h_L : altitude de l'antenne inférieure (c'est-à-dire la plus petite des valeurs de h_e et h_r)

v_{sr} : paramètre d'infraréfraction

$$v_{sr} = \min \left\{ \left(\frac{dN_{75}}{50} \right)^{1,8} \exp \left[-\frac{h_c}{2,5\sqrt{d}} \right], v_{sr\text{limit}} \right\} \quad (8)$$

qui a une limite supérieure pour les trajets à très faible dégagement, fixée par la diffraction due à l'obstruction, donnée par:

$$v_{sr\text{limit}} = \frac{dN_{75} d^{1,5} f^{0,5}}{24730} \quad \text{m} \quad (9)$$

Le paramètre dN_{75} est une prédiction empirique de 0,1% de l'augmentation de la réfractivité du mois le plus défavorable moyen en fonction de la hauteur sur les 75 m les plus bas de l'atmosphère à partir des données sur le point de rosée en surface, trouvée par interpolation bilinéaire des quatre points de grille les plus proches du tableau $dN_{75}.csv$ intégré à la présente Recommandation. Dans certaines régions de haute latitude, $dN_{75} = 0$. L'inclusion de v_{sr} dans l'équation (7) représente les effets de dépression médiane en général plutôt que l'obstruction classique du trajet à infraréfraction à gradient linéaire.

NOTE 1 – L'écart type global des erreurs de prévision obtenu en utilisant l'équation (7) est de 5,2 dB (y compris la contribution due aux variations d'une année à l'autre). L'erreur moyenne est inférieure à 3 dB pour l'ensemble des 21 régions du monde d'un rayon de 1 500 km qui ont fourni des données sur les évanouissements pour ce modèle.

NOTE 2 – L'équation (7), ainsi que le facteur géoclimatique K , découlent de multiples régressions sur des données d'évanouissement pour 539 liaisons dans diverses zones géoclimatiques du monde avec des longueurs de trajet d allant de 7,5 à 300 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 2 300 m, un dégagement moyen du terrain moyen h_c allant de 26 à 1 180 m, et un paramètre d'infraréfraction dN_{75} allant de 0 à 54 unités N. Toutes les liaisons avaient au moins un dégagement en visibilité rasante à $k_e = 1,33$.

L'équation (7) est également considérée valable 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:

$$f_{min} = 15 / d \quad \text{GHz} \quad (10)$$

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.

Étape 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):

$$p_0 = K d^{3,51} (f^2 + 13)^{0,447} \times 10^{-0,376 \tanh\left(\frac{h_c - 147}{125}\right) - 0,334 |\varepsilon_p|^{0,39} - 0,00027 h_L + 17,85 v_{sr}} \% \quad (11)$$

avec K obtenu à l'Étape 1 du § 2.3.1. À noter que l'équation (11) est équivalente à l'équation (7) avec $A = 0$.

Étape 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:

$$A_t = 25 + 1,2 \log_{10} p_0 \quad \text{dB} \quad (12)$$

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

Étape 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:

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

À noter que l'équation (13) est équivalente à l'équation (7).

Étape 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:

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

À noter que l'équation (14) est équivalente à l'équation (7), avec $A = A_t$. La valeur de p_t devrait être limitée à 99,9999% pour garantir que le logarithme naturel donné dans l'équation (15) puisse être évalué.

Calculer q'_a à partir de la valeur de l'évanouissement de transition A_t et du pourcentage de temps de transition p_t . La valeur de p_t devrait être limitée à 99,9999% pour garantir que le logarithme naturel donné dans l'équation (15) puisse être évalué.

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

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:

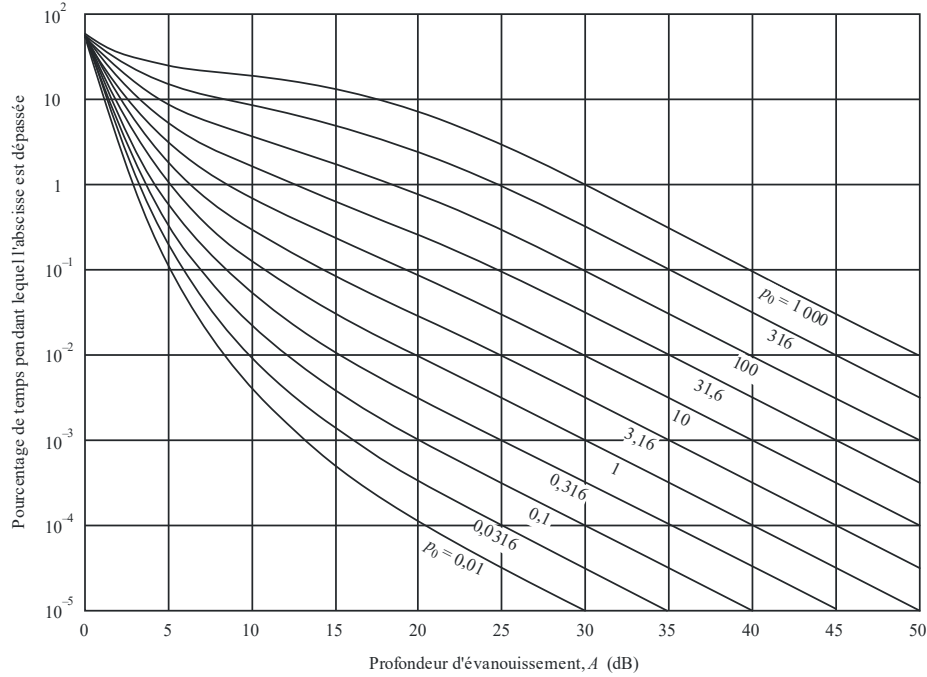
$$p_w = 100 \left[1 - \exp \left(-10^{-q_a A/20} \right) \right] \quad \% \quad (18)$$

À condition que $p_0 < 2000$, 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 (11)) 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).

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

Étape 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).

Étape 2: Calculer q'_e par:

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

Étape 3: Calculer le paramètre q_s par:

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

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

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

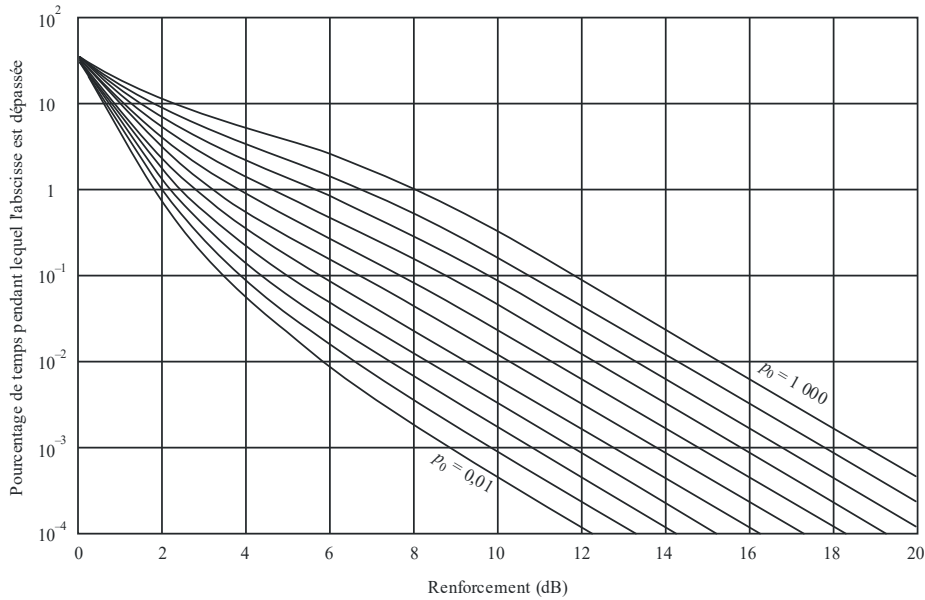
Étape 5: Le pourcentage du temps pendant lequel le renforcement E (dB) n'est pas dépassé est donné par:

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

Le jeu de courbes de la Fig. 4 donne une représentation graphique de la méthode avec p_0 comme paramètre (voir l'équation (11)). 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).

FIGURE 4

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



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

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

Les distributions d'évanouissements et de renforcement des signaux pour le mois le plus défavorable moyen, calculées d'après les méthodes décrites aux § 2.3.1 à 2.3.3, peuvent être converties en distributions pour l'année moyenne à l'aide de la méthode indiquée dans la Recommandation UIT-R P.841. Pour calculer la probabilité moyenne de dépassement du temps annuel, p , à partir de la probabilité moyenne de dépassement du temps pendant le mois le plus défavorable de l'année, p_w , on utilise la formule:

$$p = p_w / Q \quad (24)$$

où Q est le facteur de conversion. Dans la Recommandation UIT-R P.841, Q est une fonction de p_w à deux paramètres (Q_1 et β). Dans des conditions de propagation par trajets multiples, ces deux paramètres sont donnés par $Q_1 = 2,85$ et $\beta = 0,13$ pour des applications à l'échelle mondiale.

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:

$$p_{sw} = p_w \cdot (89,34T^{-0,854} + 0,676) \quad \% \quad 1 \text{ h} \leq T < 720 \text{ h pour des trajets relativement plats} \quad (25)$$

$$p_{sw} = p_w \cdot (119T^{-0,78} + 0,295) \quad \% \quad 1 \text{ h} \leq T < 720 \text{ h pour des trajets accidentés le long des côtes} \quad (26)$$

$$p_{sw} = p_w \cdot (199,85T^{-0,834} + 0,175) \quad \% \quad 1 \text{ h} \leq T < 720 \text{ h pour des trajets accidentés au-dessus des surfaces émergées} \quad (27)$$

NOTE 1 – Les formules (25) à (27) 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:

$$P_{ns} = p_w / 100 \quad (28)$$

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, par temps clair, les évanouissements profonds sur des bonds adjacents dans une liaison à bonds multiples sont presque totalement indépendants. Cela s'applique, que les évanouissements soient sélectifs en fréquence, uniformes ou les deux.

Pour une liaison à plusieurs bonds, on obtient une limite supérieure de la probabilité totale d'interruption par temps clair en faisant la somme des probabilités d'interruption pour les différents bonds. On peut obtenir une limite supérieure plus fine de la probabilité de dépassement d'une profondeur d'évanouissement A (dB) sur la liaison de n bonds, à partir de l'équation suivante (voir la Note 1):

$$P_T = \sum_{i=1}^n P_i - \sum_{i=1}^{n-1} (P_i P_{i+1})^C \quad (29)$$

$$C = 0,5 + 0,0052A + 0,0025(d_A + d_B) \quad (30)$$

où P_i est la probabilité d'interruption prévue pour le $i^{\text{ème}}$ bond sur un total de n bonds et d_i la longueur de trajet (km) du $i^{\text{ème}}$ bond. Il convient d'utiliser l'équation (30) pour $A \leq 40$ dB et $(d_i + d_{i+1}) \leq 120$ km. Au-dessus de ces limites, $C = 1$.

NOTE 1 – L'équation (30) a été obtenue sur la base de résultats de mesure pour 19 paires de bonds adjacents en visibilité directe fonctionnant dans les bandes à 4 et à 6 GHz, avec des longueurs de trajet comprises entre 33 et 64 km.

2.3.8 Données statistiques sur le nombre d'événements d'affaiblissement d'une durée égale ou supérieure à 10 s dû à la propagation par trajets multiples

Selon des études expérimentales menées en Russie, au Brésil et au Japon dans la gamme de fréquences 3,7-29,3 GHz et sur des trajets de 12,5 à 166 km, le nombre moyen d'événements d'affaiblissement N_{10s} par rapport à la probabilité de dépassement de la valeur d'affaiblissement dû à la propagation par trajets multiples, $p(A)$, pendant une période d'un an est calculé comme suit:

$$N_{10s} = 3\,650 \cdot p(A)^{0,95} \quad (31)$$

où $p(A)$ est un pourcentage.

2.4 Affaiblissement dû aux hydrométéores

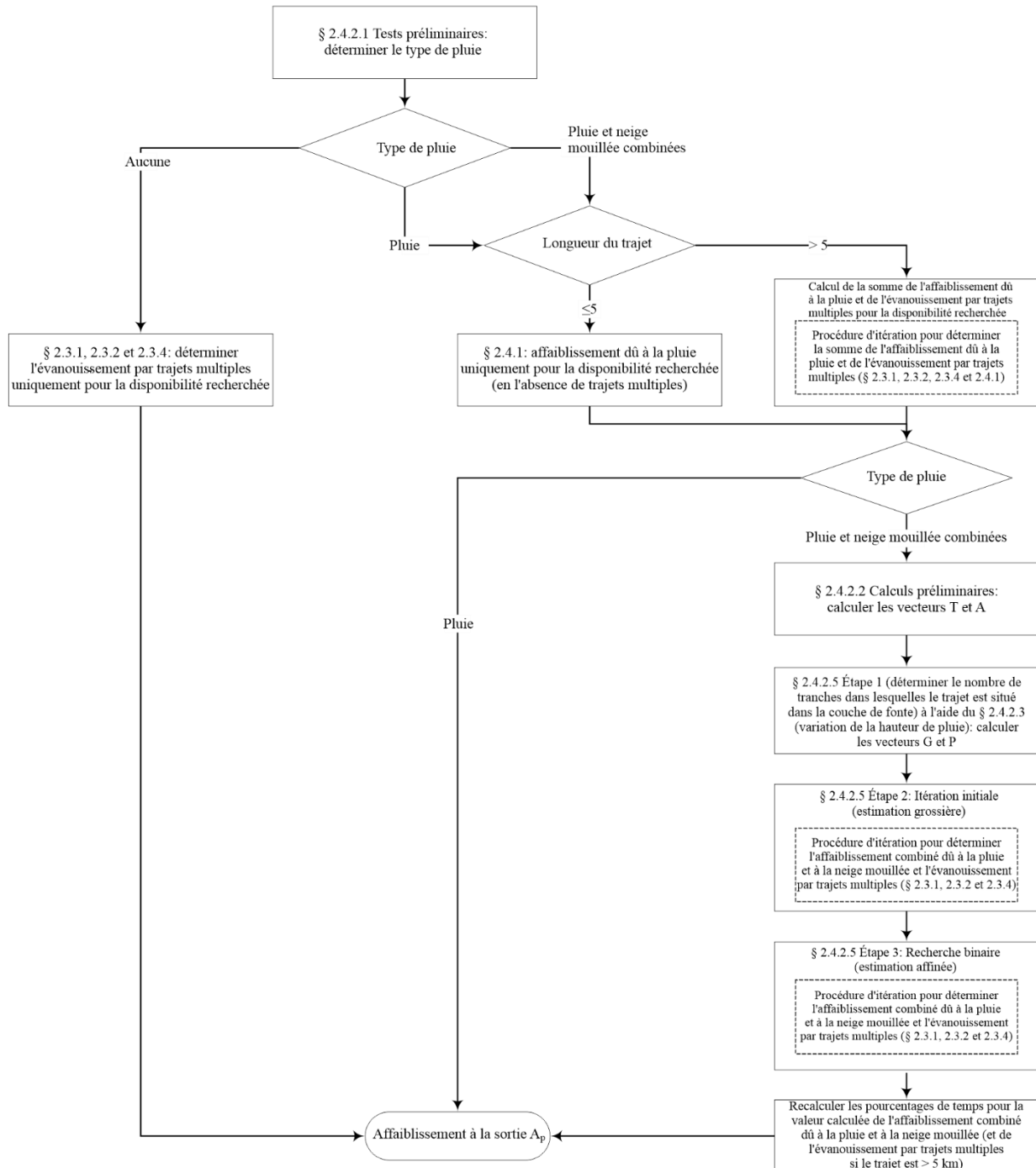
L'affaiblissement peut aussi résulter de l'absorption et de la diffusion par des hydrométéores tels que la pluie, la neige, la grêle ou le brouillard. Bien qu'on puisse négliger l'affaiblissement dû à la pluie aux fréquences inférieures à 5 GHz environ, on doit en tenir compte dans les calculs relatifs 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. Pour tenir compte des évanouissements par trajets multiples et de l'affaiblissement dû à la pluie, un processus itératif est nécessaire en fonction des paramètres de l'émetteur et du récepteur de la liaison en visibilité directe. La Figure 5 présente les paragraphes applicables de la Recommandation. Le «type de pluie» dépend de l'emplacement de la liaison et des hauteurs d'antenne par rapport à la hauteur de pluie moyenne

telle que définie au § 2.4.2.1. Dans les scénarios où la liaison se situe en totalité au-dessous de la couche de fonte, il convient de tenir compte de l'affaiblissement dû à la pluie indiqué au § 2.4.1. Il n'y a pas d'affaiblissement dû aux précipitations lorsque la liaison se situe en totalité au-dessus de la couche de fonte. Dans tous les autres cas, lorsque la liaison croise la couche de fonte, il convient d'utiliser la méthode décrite au § 2.4.2.

FIGURE 5

Procédé de détermination des évanouissements par trajets multiples et de l'affaiblissement dû aux précipitations pour une disponibilité recherchée



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:

Étape 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.

Étape 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.

Étape 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:

$$r = \frac{1}{0,477d^{0,633}R_{0,01}^{0,073-\alpha}f^{0,123} - 10,579(1 - \exp(-0,024d))} \quad (32)$$

où f (GHz) est la fréquence et α est l'exposant du modèle d'affaiblissement linéique obtenu à l'étape 2.

Toutefois, la valeur de f utilisée dans l'équation (32) ne doit pas être inférieure à 6 GHz, même si le calcul global est effectué pour des fréquences inférieures. De même, la valeur de d dans l'équation (32) doit être limitée à 30 km au maximum, et la valeur de $R_{0,01}$ ne doit pas être inférieure à 3 mm/h, même si l'on utilise une valeur plus petite dans le calcul de l'affaiblissement spécifique. Ces limites empêchent le comportement anormal de l'équation (32) tout en donnant un résultat utile.

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

$$A_{0,01} = \gamma_R d_{eff} = \gamma_R dr \quad \text{dB} \quad (33)$$

Étape 5: 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:

$$\frac{A_p}{A_{0,01}} = C_1 p^{-(C_2 + C_3 \log_{10} p)} \quad (34)$$

avec:

$$C_1 = (0,07^{C_0} [0,12^{(1-C_0)}]) \quad (35a)$$

$$C_2 = 0,855C_0 + 0,546(1 - C_0) \quad (35b)$$

$$C_3 = 0,139C_0 + 0,043(1 - C_0) \quad (35c)$$

où:

$$C_0 = \begin{cases} 0,12 + 0,4[\log_{10}(f/10)^{0,8}] & f \geq 10 \text{ GHz} \\ 0,12 & f < 10 \text{ GHz} \end{cases} \quad (36)$$

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

La procédure de prévision décrite ci-dessus est considérée comme valide dans le monde entier, pour des fréquences jusqu'à 175 GHz et des longueurs de trajet jusqu'à 60 km.

2.4.2 Méthode combinée pour la pluie et la neige mouillée

L'affaiblissement dû à la pluie A_p dépassé pendant le pourcentage de temps p , donné par la formule (34) du § 2.4.1 ci-dessus, est valable pour les trajets radioélectriques sur lesquels se produisent uniquement des précipitations liquides.

Il est possible que les particules de glace fondante ou la neige mouillée présentes dans la couche de fonte aient une influence sur les évanouissements sur un trajet de Terre. L'incidence de cet effet est déterminée par la hauteur de la liaison par rapport à la hauteur de pluie, qui varie dans le temps et en fonction de l'emplacement géographique.

La formation de givre sur une antenne, ou sur le protège-antenne ou la fenêtre de l'antenne, peut entraîner d'importants affaiblissements supplémentaires. On estime qu'il n'est pas utile d'établir un modèle global pour cet effet, car, pour un fonctionnement fiable en cas de températures négatives, les antennes doivent être protégées contre le givre. La méthode présentée ici pour évaluer l'affaiblissement combiné dû à la pluie et à la neige mouillée s'applique aux antennes sans givre.

La méthode qui suit permet d'évaluer l'affaiblissement dépassé pendant un pourcentage de temps donné compte tenu de la pluie et de la neige mouillée. Il convient d'utiliser cette méthode plutôt que celle du § 2.4.1 sauf si l'absence de neige mouillée sur le trajet est connue à l'avance. Dans la méthode présentée dans les paragraphes qui suivent, on commence par déterminer s'il faut tenir compte de la neige mouillée. Si ce n'est pas le cas, on utilise alors la méthode du § 2.4.1.

Dans le modèle combiné pour la pluie et la neige mouillée, on suppose que le taux de précipitation et la hauteur moyenne de la couche de fonte ne sont pas corrélés. Si des données locales fiables sur le plan statistique montrent qu'il existe une corrélation, il est préférable d'utiliser le modèle avec ces données sur une base saisonnière ou mensuelle, en fonction des périodes sur lesquelles on peut supposer que la corrélation est négligeable.

2.4.2.1 Tests préliminaires

Calculer les hauteurs de l'antenne la plus basse et de l'antenne la plus haute au moyen des formules:

$$h_{lo} = \min(h_1, h_2) \quad (\text{mètres au-dessus du niveau de la mer}) \quad (37a)$$

$$h_{hi} = \max(h_1, h_2) \quad (\text{mètres au-dessus du niveau de la mer}) \quad (37b)$$

où h_1 et h_2 sont les hauteurs des terminaux de la liaison en mètres au-dessus du niveau de la mer.

Déterminer la hauteur de pluie moyenne, h_{rainm} , en mètres au-dessus du niveau moyen de la mer. Si cette statistique à long terme ne peut être obtenue à partir de sources de données locales, il est possible d'obtenir une estimation à partir de la Recommandation UIT-R P.839.

Déterminer si l'un des deux cas suivants s'appliquent, pour lesquels il n'y a pas lieu de continuer à utiliser la méthode pour la pluie et la neige mouillée:

Cas 1: Si $h_{hi} \leq h_{rainm} - 3\,600$, la couche de fonte est située en totalité au-dessus du trajet. Dans ce cas, on utilise la méthode donnée au § 2.4.1 pour l'affaiblissement dû à la pluie uniquement.

Cas 2: Si $h_{lo} \geq h_{rainm} + 2\,400$, la couche de fonte est située en totalité au-dessous du trajet. Dans ce cas, l'affaiblissement dû aux précipitations peut être pris égal à zéro.

Si ni le cas 1 ni le cas 2 ne s'appliquent, poursuivre comme suit.

2.4.2.2 Calculs préliminaires

Chacun des deux calculs préliminaires suivants est effectué une seule fois.

i) *Affaiblissement dû à la pluie uniquement dépassé pendant le pourcentage de temps requis*

On utilise la méthode du § 2.4.1 pour obtenir l'affaiblissement dû à la pluie uniquement A_{rainp} dB dépassé pendant le pourcentage de temps requis p , donné par la formule (34).

ii) *Vecteurs d'affaiblissement dû à la pluie uniquement et de pourcentage de temps correspondant*

Dans le modèle combiné pour la pluie et la neige mouillée, on a besoin de plusieurs pourcentages de temps pendant lesquels des affaiblissements donnés dus à la pluie uniquement sont dépassés. Ainsi, si le modèle d'affaiblissement dû à la pluie uniquement est donné par la fonction $A(p)$, on a besoin de la fonction complémentaire $p(A)$ pour le modèle pour la pluie et la neige mouillée. Un moyen efficace d'obtenir cette fonction quel que soit le modèle d'affaiblissement dû à la pluie consiste à évaluer deux vecteurs (matrices à une dimension):

Le vecteur T contenant des valeurs de pourcentage de temps qui décroissent logarithmiquement au rythme de 10 valeurs par décade.

Le vecteur A contenant les affaiblissements correspondants dus à la pluie uniquement qui sont dépassés pendant chaque pourcentage de temps.

Dans cette description du modèle pour la pluie et la neige mouillée, les différentes composantes des vecteurs sont désignées par des indices entre crochets. Pour les vecteurs T et A , l'indice le plus faible est égal à zéro.

La première valeur de chaque vecteur est donnée par:

$$T_{[0]} = P_0 \quad (\% \text{ du temps}) \quad (38)$$

$$A_{[0]} = 0 \quad (\text{dB}) \quad (39)$$

où P_0 est la probabilité de pluie, exprimée en pourcentage, pendant une année moyenne, donnée par la formule (1) de la Recommandation UIT-R P.837-6.

Pour les indices $t = 1, 2, 3 \dots$ etc., les paires successives de valeurs sont données par:

$$T_{[t]} = P_0 10^{-0,1t} \quad (\% \text{ du temps}) \quad (40)$$

$$A_{[t]} = A(T_{[t]}) \quad (\text{dB}) \quad (41)$$

où $A(T_{[t]})$ est l'affaiblissement dû à la pluie uniquement qui est dépassé pendant le pourcentage de temps $T_{[t]}$ donné par la formule (34).

On continue à utiliser les formules (40) et (41) pour les valeurs successives de l'indice t tant que $T_{[t]} \geq 0,001\%$ ou $A_{[t]} - A_{[t-1]} \geq 0,1$ dB.

Les valeurs suivantes seront utilisées ultérieurement dans les calculs:

$$N_{last} = N_t - 1 \quad (42)$$

$$A_{last} = A_{[N_{last}]} \quad (\text{dB}) \quad (42a)$$

$$T_{last} = T_{[N_{last}]} \quad (\% \text{ du temps}) \quad (42b)$$

où N_t est le nombre de composantes de chacun des vecteurs A et T .

2.4.2.3 Variation de la hauteur de pluie

Si elles sont disponibles, il convient d'utiliser les statistiques à long terme de variabilité de la hauteur de pluie mesurée. Si ces données ne sont pas disponibles, la variation de la hauteur de pluie est modélisée par 49 hauteurs par rapport à la hauteur de pluie moyenne, avec une probabilité associée à chacune comme indiqué dans le Tableau 2, qui donne chacune des probabilités Π_n que la hauteur de pluie soit comprise dans chacun des 49 intervalles de 100 mètres par rapport à la hauteur de pluie moyenne. On prend l'hypothèse d'une distribution normale, de sorte que chacune des probabilités à l'exception de la probabilité centrale correspond à deux indices, comme indiqué dans la partie gauche du tableau.

TABLEAU 2

| Indice n | | Probabilité Π_n |
|------------|------|------------------------|
| Soit | Soit | |
| 0 | 48 | 0,000555 |
| 1 | 47 | 0,000802 |
| 2 | 46 | 0,001139 |
| 3 | 45 | 0,001594 |
| 4 | 44 | 0,002196 |
| 5 | 43 | 0,002978 |
| 6 | 42 | 0,003976 |
| 7 | 41 | 0,005227 |
| 8 | 40 | 0,006764 |
| 9 | 39 | 0,008617 |
| 10 | 38 | 0,010808 |
| 11 | 37 | 0,013346 |
| 12 | 36 | 0,016225 |
| 13 | 35 | 0,019419 |
| 14 | 34 | 0,022881 |
| 15 | 33 | 0,026542 |
| 16 | 32 | 0,030312 |
| 17 | 31 | 0,034081 |
| 18 | 30 | 0,037724 |
| 19 | 29 | 0,041110 |
| 20 | 28 | 0,044104 |
| 21 | 27 | 0,046583 |
| 22 | 26 | 0,048439 |
| 23 | 25 | 0,049588 |
| 24 | | 0,049977 |

2.4.2.4 Définition des fonctions utilisées dans la méthode qui suit

La méthode par étapes présentée au § 2.4.2.5 ci-après utilise plusieurs fois les trois fonctions suivantes.

Fonction 1: Multiplicateur d'affaiblissement

La variation de l'affaiblissement linéique, en tant que multiplicateur de l'affaiblissement en dB, est définie en fonction de la hauteur par rapport à la hauteur de pluie en mètres:

$$\Gamma(\Delta h) = \begin{cases} 0 & 0 < \Delta h \\ \frac{4(1 - e^{\Delta h / 70})^2}{\left(1 + \left(1 - e^{-(\Delta h / 600)^2}\right)^2 \left(4(1 - e^{\Delta h / 70})^2 - 1\right)\right)} & -1\,200 \leq \Delta h \leq 0 \\ 1 & \Delta h < -1\,200 \end{cases} \quad (43)$$

où $\Delta h = h - h_{rainm}$ et h est la hauteur considérée.

Cette fonction est utilisée plusieurs fois pour différentes valeurs de Δh . L'effet des particules de glace fondante est modélisé comme étant important entre la hauteur de pluie et 1 200 mètres plus bas. L'affaiblissement dû à la présence éventuelle de glace sèche au-dessus de la hauteur de pluie est supposé être négligeable. Au-dessous de 1 200 m au-dessous de la hauteur de pluie, le multiplicateur est égal à 1, ce qui correspond à un affaiblissement normal dû à la pluie uniquement.

Fonction 2: Multiplicateur moyen sur le trajet

Le multiplicateur d'affaiblissement moyen sur le trajet $g(h_{rain})$ est défini en fonction de la hauteur de pluie, h_{rain} , en mètres au-dessus du niveau de la mer, pour un trajet radioélectrique donné. Cette fonction est utilisée pour différentes valeurs de la hauteur de pluie afin de tenir compte de la variabilité de la hauteur de pluie autour de la valeur moyenne h_{rainm} .

La fonction subdivise la hauteur de 1 200 mètres de la couche de fonte en 12 tranches de 100 mètres chacune, d'indice 1 pour la plus haute à l'indice 12 pour la plus basse. Les tranches sont donc numérotées vers le bas à partir de la hauteur de pluie. Pour les calculs, on peut utiliser des indices dont les valeurs sont négatives au-dessus de la hauteur de pluie et dont les valeurs sont supérieures à 12 au-dessous de la couche de fonte.

On calcule les indices de la tranche la plus basse et de la tranche la plus haute contenant une partie quelconque du trajet:

$$s_{lo} = 1 + \text{floor}\left(\frac{h_{rain} - h_{lo}}{100}\right) \quad (44a)$$

$$s_{hi} = 1 + \text{floor}\left(\frac{h_{rain} - h_{hi}}{100}\right) \quad (44b)$$

où la fonction «floor» donne le plus grand entier ne dépassant pas l'argument, et h_{lo} et h_{hi} sont évalués au § 2.4.2.1 ci-dessus.

On doit maintenant envisager les cas suivants:

Si $s_{lo} < 1$, le trajet est situé en totalité au-dessus de la couche de fonte. Dans ce cas, $g = 0$ et aucun autre calcul n'est nécessaire à ce stade.

Si $s_{hi} > 12$, le trajet est situé en totalité au-dessous de la couche de fonte. Dans ce cas, $g = 1$ et aucun autre calcul n'est nécessaire à ce stade.

Si $s_{lo} = s_{hi}$, le trajet est situé en totalité dans une tranche de la couche de fonte. Dans ce cas:

$$g = \Gamma(\delta h) \quad (45)$$

$$\text{où} \quad \delta h = 0,5 (h_{lo} + h_{hi}) - h_{rain} \quad (45a)$$

et aucun autre calcul n'est nécessaire.

Si les calculs atteignent ce stade, le trajet doit traverser plus d'une tranche de la couche de fonte. Il se peut aussi que des parties du trajet soient situées au-dessous et au-dessus de la couche.

On calcule les premier et dernier indices de tranche à prendre en compte dans la boucle qui suit:

$$s_{first} = \max(s_{hi}, 1) \quad (46a)$$

$$s_{last} = \min(s_{lo}, 12) \quad (46b)$$

On initialise le multiplicateur g à zéro, qui servira d'accumulateur.

Pour chaque indice de tranche s de s_{first} à s_{last} inclus:

Début des calculs pour chaque indice de tranche

Une et une seule des trois conditions suivantes doit être vraie. Pour la condition qui est vraie, on calcule la hauteur moyenne du trajet dans la tranche par rapport à la hauteur de pluie Δh et la fraction du trajet qui est située dans la tranche q .

Si $s_{hi} < s$ et $s < s_{lo}$, le trajet traverse entièrement la tranche:

$$\Delta h = 100(0,5 - s) \text{ (m)} \quad (47a)$$

$$q = \frac{100}{h_{hi} - h_{lo}} \quad (47b)$$

Si $s = s_l$, l'antenne la plus basse se trouve dans la tranche:

$$\Delta h = 0,5[h_{lo} - h_{rain} - 100(s - 1)] \text{ (m)} \quad (48a)$$

$$q = \frac{h_{rain} - 100(s - 1) - h_{lo}}{h_{hi} - h_{lo}} \quad (48b)$$

Si $s = s_{hi}$, l'antenne la plus haute se trouve dans la tranche:

$$\Delta h = 0,5[h_{hi} - h_{rain} - 100s] \text{ (m)} \quad (49a)$$

$$q = \frac{h_{hi} - h_{rain} + 100s}{h_{hi} - h_{lo}} \quad (49b)$$

Une fois calculés Δh et q dans l'un des trois cas précédents:

On utilise la fonction 1, définie ci-dessus, pour calculer le multiplicateur d'affaiblissement pour la tranche:

$$g_{slice} = \Gamma(\Delta h) \quad (50)$$

On cumule le multiplicateur pondéré par la fraction du trajet qui se trouve dans la tranche:

$$g = g + q g_{slice} \quad (51)$$

Fin des calculs pour chaque indice de tranche

Si $s_{lo} > 12$, une partie du trajet se trouve au-dessous de la couche de fonte. Uniquement dans ce cas, on calcule la fraction du trajet qui se trouve au-dessous de la couche:

$$q = \frac{h_{rain} - 1200 - h_{lo}}{h_{hi} - h_{lo}} \quad (52)$$

et comme le multiplicateur d'affaiblissement est égal à 1 dans ce cas, on cumule simplement la fraction du trajet:

$$g = g + q \quad (53)$$

Le multiplicateur d'affaiblissement moyen sur le trajet, g , pour la hauteur de pluie actuelle est alors calculé.

Fonction 3: Pourcentage de temps en fonction de l'affaiblissement dû à la pluie uniquement

La fonction $T(A)$ retourne le pourcentage de temps pendant lequel un affaiblissement donné dû à la pluie uniquement, A (dB), est dépassé d'après la formule (33). On obtient une bonne approximation de cette fonction en utilisant les vecteurs T et A évalués au § 2.4.2.2 ii).

Le modèle d'affaiblissement dû à la pluie du § 2.4.1 n'est pas valable pour les pourcentages de temps inférieurs à 0,001%, mais des pourcentages de temps plus faibles peuvent être nécessaires pour le modèle pour la pluie et la neige mouillée. C'est pourquoi le modèle pour la pluie est étendu pour les affaiblissements supérieurs à A_{last} , avec une pente constante de 1 dB/décade de pourcentage de temps. Des tests ont montré que cette extension n'apporte que de faibles contributions au résultat final, qui ne dépend pas du choix de la pente.

On utilise l'un des deux cas suivants:

Cas 1: $A > A_{last}$

Dans ce cas, p est obtenu à partir de l'extension pour les faibles pourcentages de temps comme suit:

$$p = 10^{A_{last}-A+\log(T_{last})} \quad (54)$$

où A_{last} et T_{last} sont obtenus respectivement par les formules (42a) et (42b).

Cas 2: $A \leq A_{last}$

Dans ce cas, p est calculé à partir des vecteurs A et T comme suit.

On initialise les indices inférieur et supérieur pour A et T aux valeurs correspondant aux vecteurs complets:

$$k_{inf} = 0 \quad (55a)$$

$$k_{sup} = N_{last} \quad (55b)$$

Le calcul itératif suivant permet de déterminer les valeurs de k_{inf} et k_{sup} qui encadrent A .

Tant que $k_{sup} - k_{inf} > 1$

Début de la boucle «tant que»

$$k_{try} = \text{floor}\left(\frac{k_{inf}+k_{sup}}{2}\right) \quad (56)$$

$$\text{Si } A_{k_{try}} < A \quad k_{inf} = k_{try} \quad (56a)$$

$$\text{Sinon} \quad k_{sup} = k_{try} \quad (56b)$$

Fin de la boucle «tant que»

où la fonction «floor» donne le plus grand entier ne dépassant pas l'argument.

On obtient maintenant une bonne approximation du pourcentage de temps requis par interpolation logarithmique:

$$p = 10^u \quad (57)$$

$$\text{où} \quad u = \log_{10}\left(T_{[k_{sup}]}\right) + \log_{10}\left(\frac{T_{[k_{inf}]}}{T_{[k_{sup}]}}\right) \frac{A_{[k_{sup}]}-A}{A_{[k_{sup}]}-A_{[k_{inf}]}} \quad (57a)$$

La fonction $T(A)$ retourne la valeur de p calculée par la formule (54) ou la formule (57).

2.4.2.5 Description des différentes étapes de la méthode pour la pluie et la neige mouillée

Étape 1: Vecteurs de multiplicateurs et de probabilités

On utilise la méthode qui suit pour calculer deux vecteurs, G contenant des multiplicateurs d'affaiblissement moyens sur le trajet, et P contenant les probabilités correspondantes.

Les vecteurs \mathbf{G} et \mathbf{P} doivent avoir au plus 49 composantes chacun. Dans la description suivante, on suppose que ce nombre d'emplacements est disponible dans chaque vecteur. Le nombre effectivement utilisé est calculé sous la forme de l'entier M .

Comme pour les vecteurs \mathbf{T} et \mathbf{A} , les différentes composantes de \mathbf{G} et de \mathbf{P} sont désignées par des indices entre crochets, à partir de zéro.

On initialise toutes les composantes de \mathbf{G} et de \mathbf{P} à zéro.

On initialise $G_{[0]}$ à 1.

On initialise chacun des indices n et m à zéro.

On démarre alors une boucle de calcul dans laquelle la valeur de n est incrémentée de $n = 0$ à $n = 48$.

Début de la boucle de calcul pour toutes les valeurs de l'indice n

Sous-étape a) On calcule la hauteur de pluie:

$$h_{rain} = h_{rainm} - 2\,400 + 100n \quad (\text{mètres au-dessus du niveau de la mer}) \quad (58)$$

Sous-étape b) Si $h_{lo} \geq h_{rain}$, la couche de fonte est située en totalité au-dessous du trajet pour cette hauteur de pluie. Dans ce cas, aucune donnée n'est nécessaire dans les vecteurs \mathbf{G} et \mathbf{P} . Si $n < 48$, on incrémente n et on retourne à la sous-étape a), sinon on sort de cette boucle et on passe à la formule (63).

Si $h_{lo} < h_{rain}$, on passe à la sous-étape c).

Sous-étape c) Si $h_{hi} > (h_{rain} - 1\,200)$, une partie au moins du trajet est située dans la couche de fonte. Dans ce cas, on procède comme suit:

On utilise la fonction 2 définie au § 2.4.2.4 avec la valeur actuelle de h_{rain} comme argument pour calculer le multiplicateur d'affaiblissement moyen sur le trajet g pour cette hauteur de pluie, qui est placé dans le vecteur \mathbf{G} en tant que composante correspondant à la valeur actuelle de l'indice m :

$$G_{[m]} = g(h_{rain}) \quad (59)$$

La probabilité associée à cette hauteur de pluie est placée dans le vecteur \mathbf{P} :

$$P_{[m]} = \Pi_{[n]} \quad (60)$$

où $\Pi_{[n]}$ est tiré du Tableau 2.

Si $n < 48$, on incrémente l'indice m .

Si $n < 48$, on incrémente n et on retourne à la sous-étape a), sinon on sort de cette boucle et on passe à la formule (63).

Si $h_{hi} \leq (h_{rain} - 1\,200)$, on passe à la sous-étape d).

Sous-étape d) On atteint cette étape pour les valeurs de n pour lesquelles la couche de fonte est en totalité au-dessus du trajet. On place un multiplicateur égal à 1 dans le vecteur \mathbf{G} :

$$G_{[m]} = 1 \quad (61)$$

On cumule la probabilité associée à cette hauteur de couche dans le vecteur \mathbf{P} :

$$P_{[m]} = P_{[m]} + \Pi_{[n]} \quad (62)$$

où $\Pi_{[n]}$ est tiré du Tableau 2.

Il est à noter que l'indice m n'est pas incrémenté dans cette sous-étape.

Si $n < 48$, on incrémente n et on retourne à la sous-étape a), sinon on sort de cette boucle et on passe à la formule (63).

Fin de la boucle de calcul pour toutes les valeurs de l'indice n

On calcule le nombre de composantes dans chacun des vecteurs \mathbf{G} et \mathbf{P} :

$$M = m + 1 \quad (63)$$

Étape 2: Itération initiale

On initialise la valeur d'essai de l'affaiblissement:

$$A_{trial} = A_{rainp} \text{ (dB)} \quad (64)$$

où A_{rainp} a été calculé d'après le § 2.4.2.2 i).

On calcule le pourcentage de temps correspondant pendant lequel cette valeur d'essai de l'affaiblissement est dépassée:

$$p_{trial} = \sum_{m=0}^{M-1} \mathbf{P}_{[m]} T\left(\frac{A_{trial}}{\mathbf{G}_{[m]}}\right) \text{ (%) } \quad (65)$$

où T est la fonction 3 définie au § 2.4.2.4 ci-dessus.

En vue d'une recherche binaire, on calcule une valeur minimale et une valeur maximale d'affaiblissement en utilisant l'un des deux cas suivants:

Cas 1: $p_{trial} > p$:

Dans ce cas, la valeur d'essai de l'affaiblissement est augmentée par incréments de A_p jusqu'à ce que $p_{trial} \leq p$, comme suit:

Tant que $p_{trial} > p$:

Début de la boucle «tant que»:

On incrémente la valeur d'essai de l'affaiblissement et on calcule la valeur correspondante de p_{trial} :

$$A_{trial} = A_{trial} + A_{rainp} \text{ (dB)} \quad (66a)$$

$$p_{trial} = \sum_{m=0}^{M-1} \mathbf{P}_{[m]} T\left(\frac{A_{trial}}{\mathbf{G}_{[m]}}\right) \text{ (%) } \quad (66b)$$

Fin de la boucle «tant que»:

$$A_{min} = A_{trial} - A_{rainp} \text{ (dB)} \quad (67a)$$

$$A_{max} = A_{trial} \text{ (dB)} \quad (67b)$$

Cas 2: $p_{trial} \leq p$:

Dans ce cas, on définit A_{min} et A_{max} directement à l'aide des formules:

$$A_{min} = 0,01 \text{ (dB)} \quad (68a)$$

$$A_{max} = A_{trial} \text{ (dB)} \quad (68b)$$

On réinitialise la valeur d'essai de l'affaiblissement au centre de l'intervalle de recherche en dB:

$$A_{trial} = 0,5(A_{min} + A_{max}) \text{ (dB)} \quad (69)$$

Étape 3: Recherche binaire

On définit l'intervalle de recherche cible pour l'affaiblissement:

$$A_{range} = \min(0,1, 0,01A_{rainp}) \text{ (dB)} \quad (70)$$

où A_{rainp} a été calculé d'après le § 2.4.2.2 i).

Tant que $(A_{max} - A_{min}) > A_{range}$

Début de la boucle «tant que».

On recalcule p_{trial} à l'aide de la formule (65) avec la valeur actuelle de A_{trial} .

On redéfinit l'intervalle de recherche en fonction de l'un des cas suivants:

Si $p_{trial} > p$

$$A_{min} = A_{trial} \quad (\text{dB}) \quad (71a)$$

Si $p_{trial} \leq p$

$$A_{max} = A_{trial} \quad (\text{dB}) \quad (71b)$$

On recalcule A_{trial} à l'aide de la formule (69) avec les valeurs actuelles de A_{min} et de A_{max} .

Fin de la boucle «tant que»

L'affaiblissement combiné dû à la pluie et à la neige mouillée dépassé pendant $p\%$ du temps est alors donné par A_{trial} (dB).

2.4.3 Transposition en fréquence des 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 bond et dans la même région climatique:

$$A_2 = A_1 (\Phi_2 / \Phi_1)^{1 - H(\Phi_1, \Phi_2, A_1)} \quad (72)$$

où:

$$\Phi(f) = \frac{f^2}{1 + 10^{-4} f^2} \quad (73)$$

$$H(\Phi_1, \Phi_2, A_1) = 1,12 \times 10^{-3} (\Phi_2 / \Phi_1)^{0,5} (\Phi_1 A_1)^{0,55} \quad (74)$$

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.

2.4.4 Transposition en polarisation des 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:

$$A_V = \frac{300 A_H}{335 + A_H} \quad \text{dB} \quad (75)$$

ou

$$A_H = \frac{335 A_V}{300 - A_V} \quad \text{dB} \quad (76)$$

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

2.4.5 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:

$$N(A) = T(A) / D_m(A) \quad (77)$$

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 (voir la Note 1):

$$N_{10s}(A) = 1 + 1313 \cdot [p(A)]^{0,945} \quad (78)$$

où $p(A)$ est le pourcentage du temps pendant lequel l'affaiblissement dû à la pluie A (dB) est dépassé pendant l'année moyenne. Si les mesures effectuées à long terme par des sources locales ne peuvent fournir ce renseignement, on peut l'obtenir en résolvant de façon numérique l'équation (34) figurant au § 2.4.1.

NOTE 1 – L'équation (78) est basée sur les résultats de mesures effectuées pendant un à trois ans sur 27 liaisons pour des fréquences comprises entre 12,3 et 83 GHz et des longueurs de trajet comprises entre 1,2 et 43 km, au Brésil, en Norvège, au Japon et en Fédération de Russie.

La fréquence d'interruption (OI) est définie comme le nombre d'événements d'indisponibilité par an. Pour les liaisons radioélectriques numériques, un événement d'indisponibilité se produit dès lors qu'un taux d'erreur sur les bits spécifié est dépassé pendant des périodes supérieures à 10 secondes. La méthode suivante devrait être utilisée pour prévoir la fréquence d'interruption causée par l'affaiblissement dû à la pluie sur des liaisons à un seul bond:

Étape 1: Obtenir le pourcentage de temps $p(M)$ pendant lequel la marge de liaison M (dB) pour l'affaiblissement dû à la pluie est dépassée. Si les mesures effectuées à long terme par des sources locales ne peuvent fournir ce renseignement, on peut l'obtenir en résolvant l'équation (34) figurant au § 2.4.1 avec $A_p = M$.

Étape 2: Une valeur approchée de la fréquence d'interruption due à la pluie est donnée par:

$$OI(M) = N_{10s}(M) \quad (79)$$

où M (dB) est la marge de liaison associée au taux d'erreur sur les bits ou au taux d'erreur sur les blocs présentant un intérêt et N_{10s} est donné par l'équation (78).

Un ensemble de mesures (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 l'indisponibilité 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.

2.4.6 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.

2.4.6.1 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.

2.4.6.2 Évanouissements 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:

$$P_T = \sum_{i=1}^n P_i \quad (80)$$

où P_i est la probabilité d'évanouissement relatif au $i^{\text{ème}}$ trajet sur un total de n .

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

$$P_T = K \sum_{i=1}^n P_i \quad (81)$$

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. 6). 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.

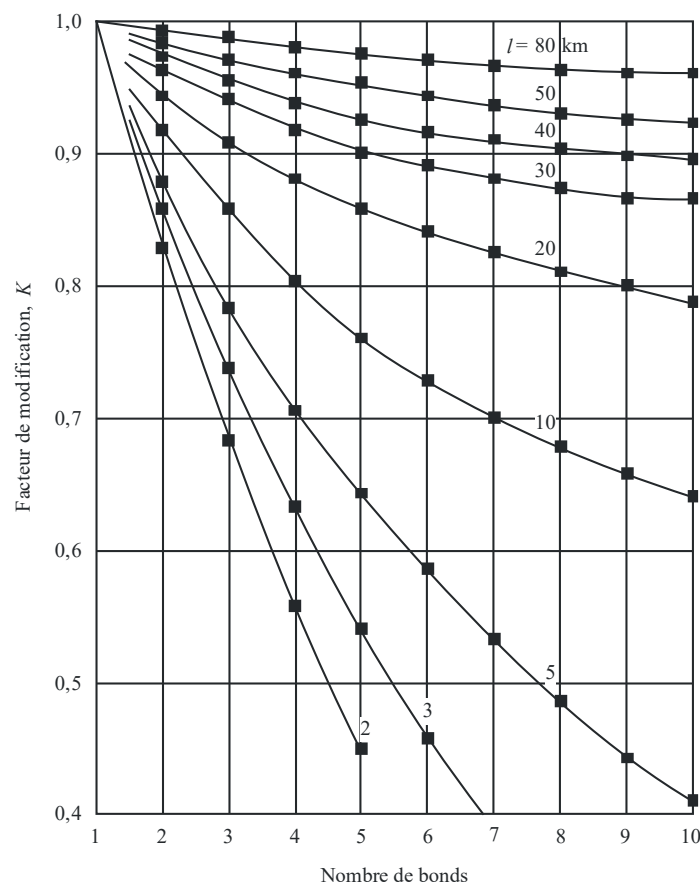
Les facteurs de modification, pour le cas de la propagation dans une direction perpendiculaire à celle du mouvement dominant des orages, sont illustrés sur la Fig. 8 pour divers niveaux de probabilité. Dans une telle situation, les facteurs de modification décroissent plus rapidement pour les tout premiers 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).

2.4.6.3 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.

FIGURE 6

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



2.4.6.3.1 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.

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

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

Étape 1: Calculer une valeur approchée de la distribution annuelle de l'affaiblissement dû à la pluie A_i (en dB) sur chaque trajet $i=1,2$ en employant la distribution log-normale:

$$P(A_i) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\ln A_i - \ln A_{mi}}{\sqrt{2} S_{ai}} \right) \quad (82)$$

où $\operatorname{erfc}(x) = 2/\sqrt{\pi} \int_x^\infty e^{-t^2} dt$ est la fonction d'erreur complémentaire. Pour calculer A_{mi} et S_{ai} , il est recommandé d'utiliser une procédure d'ajustement sur les mesures locales disponibles ou sur la distribution de l'affaiblissement dû à la pluie (voir § 2.4.1 de la Recommandation UIT-R P.530-12). Cette procédure est décrite en détail dans l'Annexe 2 de la Recommandation UIT-R P.1057-2.

Étape 2: Déterminer la constante d'inhomogénéité de la pluie D_r , c'est-à-dire la distance en km à laquelle le coefficient de corrélation est égal à $\sqrt{2}/2$. Une règle simple pour calculer D_r dépend de la latitude absolue $|lat|$ de l'emplacement:

$$D_r = \begin{cases} 1 & |lat| \leq 23^\circ \\ 1.5 & 23^\circ < |lat| \leq 50^\circ \\ 1.75 & |lat| > 50^\circ \end{cases} \quad (83)$$

Étape 3: Déterminer la distance caractéristique de la zone de précipitation $D_c = 20 \times D_r$.

Étape 4: Évaluer le paramètre spatial H_i , $i=1,2$, sur chacune des variantes de trajet de longueur L_i :

$$H_i = 2L_i D_r \sinh^{-1} (L_i / D_r) + 2D_r^2 \left(1 - \sqrt{(L_i / D_r)^2 + 1} \right), \quad i = 1, 2 \quad (84)$$

Étape 5: Évaluer le paramètre spatial H_{12} entre les deux trajets:

$$H_{12} = \int_0^{L_1} \int_0^{L_2} \rho_0(d) d\ell_1 d\ell_2 \quad (85)$$

où:

$$\rho_0(d) = \begin{cases} \frac{D_r}{\sqrt{D_r^2 + d^2}} & d \leq D_c \\ \frac{D_r}{\sqrt{D_r^2 + D_c^2}} & d > D_c \end{cases} \quad (86)$$

et la distance des deux points des deux autres trajets formant un angle ϕ est donnée par:

$$d^2 = \ell_1^2 + \ell_2^2 - 2\ell_1\ell_2 \cos \phi, \quad 0 < \ell_1 \leq L_1, \quad 0 < \ell_2 \leq L_2 \quad (87)$$

Étape 6: Calculer le coefficient de corrélation de l'affaiblissement dû à la pluie:

$$\rho_a = \frac{1}{S_{a1}S_{a2}} = \ln \left[\frac{H_{12}}{\sqrt{H_1 H_2}} \left(e^{S_{a1}^2} - 1 \right)^{1/2} \left(e^{S_{a2}^2} - 1 \right)^{1/2} + 1 \right] \quad (88)$$

Étape 7: La distribution cumulative de l'affaiblissement différentiel dû à la pluie A_1 - A_2 dépassant le seuil δA (en dB) est donnée par:

$$P_{DRA} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{u_{01}}{\sqrt{2}} \right) - \frac{1}{2} \int_{u_{01}}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left(-\frac{u_1^2}{2} \right) \operatorname{erfc} \left(\frac{u_{02} - \rho_a u_1}{\sqrt{2} \sqrt{1 - \rho_a^2}} \right) du_1 \quad (89)$$

où:

$$u_i = \frac{\ln A_i - \ln A_{mi}}{S_{ai}}, \quad i = 1, 2 \quad (90)$$

$$u_{01} = \frac{\ln \delta a - \ln A_{m1}}{S_{a1}} \quad (91)$$

$$u_{02} = \frac{\ln (A_{m1} \exp(u_1 S_{a1}) - \delta a) - \ln A_{m2}}{S_{a2}} \quad (92)$$

2.4.6.3.2 Trajets parallèles séparés horizontalement

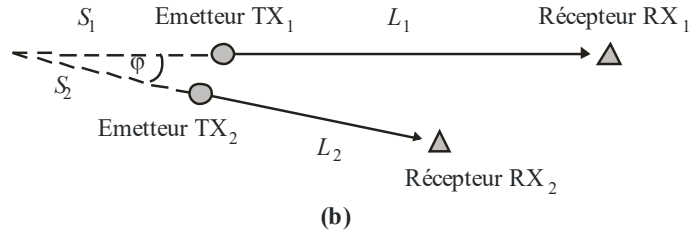
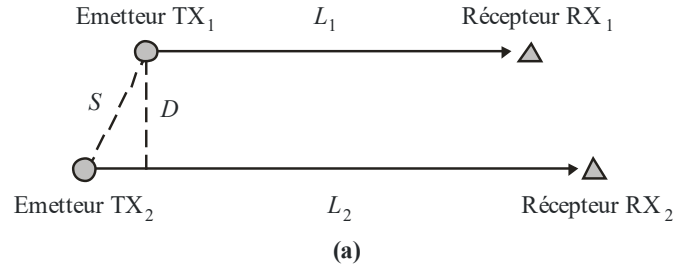
Des résultats expérimentaux obtenus au Royaume-Uni, dans la gamme 20-40 GHz, donnent une indication de l'amélioration qui peut être réalisée dans la fiabilité d'une liaison lorsqu'on utilise des éléments de trajet parallèles de réseaux à diversité d'acheminement, comme le montre la Fig. 7a. Le gain de 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.

Les étapes nécessaires pour calculer l'amélioration de la diversité I et le gain de diversité G pour des trajets parfaitement parallèles sont les suivantes:

FIGURE 7

(a) Géométrie à diversité d'acheminement pour des trajets parallèles; (b) Géométrie à diversité d'acheminement pour des trajets qui ne sont pas parfaitement parallèles



Étape 1: Suivre les étapes 1 à 4 du § 2.4.6.3.1.

Étape 2: Calculer H_{12} selon l'équation (84). Étant donné qu'il ne s'agit plus de trajets convergents mais de trajets parallèles, l'étape 5 de la procédure présentée au § 2.4.6.3.1 est modifiée. En particulier, la définition de la distance d entre deux points des éléments des autres trajets, qui est utilisée pour calculer le coefficient de corrélation $\rho_0(d)$ dans l'équation (86) est, en l'espèce, exprimée comme suit:

$$d^2 = S^2 + 2\sqrt{S^2 - D^2}|\ell_1 - \ell_2| + (\ell_1 - \ell_2)^2 \quad 0 < \ell_1 \leq L_1, \quad 0 < \ell_2 \leq L_2 \quad (93)$$

où les trajets parallèles sont séparés horizontalement par une distance D et S est la distance entre les deux émetteurs (voir la Fig. 7a).

Étape 3: Répéter l'étape 6 du § 2.4.6.3.1 en utilisant la valeur de H_{12} obtenue à l'étape 2.

Étape 4: La distribution cumulative pour la configuration à diversité d'acheminement pour des trajets parallèles dépassant une profondeur d'évanouissement A_i est donnée par:

$$P_d(A_i) = \frac{1}{2} \int_{u_2}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{u_1 - \rho_a u}{\sqrt{2}\sqrt{1-\rho_a}}\right) du \quad (94)$$

où $u_i, i=1,2$, est donné dans l'équation (90).

Étape 5: L'amélioration de la diversité I au niveau d'évanouissement de référence A_i est obtenue grâce à la relation suivante:

$$I(A_i) = \frac{P(A_i)}{P_d(A_i)} \quad i=1,2 \quad (95)$$

Étape 6: Le gain de diversité G au pourcentage de référence t est obtenu grâce à la relation suivante (voir la Note 1):

$$G(A_i) = A_i(t) - A_d(t) \quad i=1,2 \quad (96)$$

NOTE 1 – Pour calculer $A_i(t)$ et $A_d(t)$ dans l'équation (96), les équations (82) et (94) doivent être inversées.

Pour inverser l'équation (94), il faut appliquer une analyse numérique.

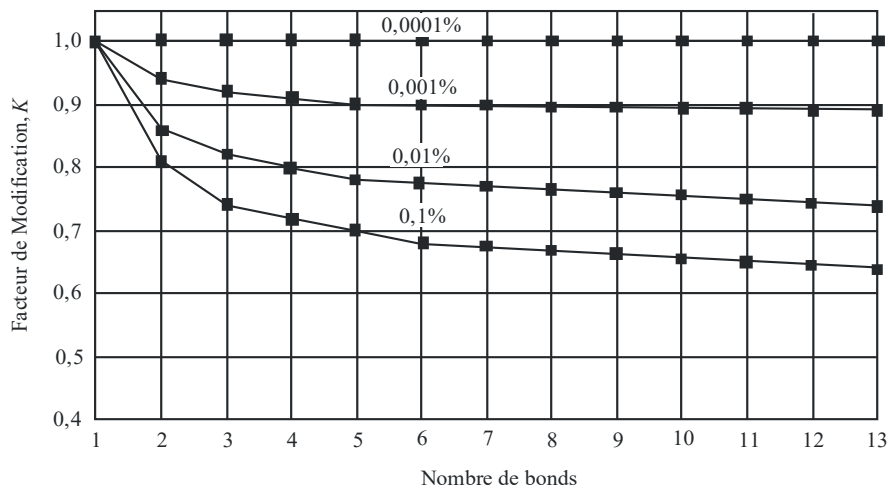
Dans le cas où les deux variantes de trajet dévient de manière significative et ne sont plus complètement parallèles, comme le montre la Fig. 7b, les extensions des deux liaisons se coupent à un point donné à des distances S_1 et S_2 des émetteurs. Là encore, pour obtenir les chiffres présentant un intérêt concernant la diversité (gain et amélioration), on répète les étapes 1 à 6 du présent paragraphe. Cependant, dans ce cas, d est donnée par l'équation (87) et H_{12} est exprimé comme suit:

$$H_{12} = \int_{S_1}^{S_1+L_1} \int_{S_2}^{S_2+L_2} \rho_0(d=|\ell_1 - \ell_2|) d\ell_1 d\ell_2 \quad (97)$$

FIGURE 8

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)



2.4.6.4 Trajets avec répéteurs passifs

2.4.6.4.1 Répéteurs à réflecteurs plans

Pour les trajets comportant deux ou plus de deux tronçons (N au total) sur lesquels on utilise des réflecteurs passifs plans qui sont à quelques degrés près parallèles (voir la Note 1), on calcule l'affaiblissement dû à la pluie sur l'ensemble du trajet en remplaçant la longueur du trajet:

$$d = d_{leg1} + d_{leg2} + \dots + d_{legN} \quad \text{km} \quad (98)$$

dans la méthode du § 2.4.1 ainsi que dans le calcul du facteur de réduction de la distance (équation (32)).

NOTE 1 – Aucune directive stricte ne peut être donnée actuellement sur le degré de parallélisme entre les différents tronçons du trajet. Si les tronçons ne sont pas parallèles, la formule utilisée dans l'équation (98) se traduira par un facteur de réduction r dans l'équation (32) qui est plus petit que ce qu'il devrait être, ce qui conduira à sous-estimer l'affaiblissement total effectif. Une solution possible pourrait être d'utiliser à la fois l'équation (98) et la longueur du trajet que l'on obtient en joignant les extrémités du premier et du dernier tronçon dans le calcul du facteur de réduction, puis en faisant la moyenne des résultats.

Une autre méthode pourrait consister à traiter les différents tronçons comme des trajets indépendants et à utiliser les données figurant au § 2.4.6.

2.4.6.4.2 Antennes-relais dos à dos

Si la polarisation est la même sur les deux ou plus de deux tronçons du trajet, on calcule les statistiques relatives à l'affaiblissement en utilisant la méthode du § 2.4.6.4.1 pour des réflecteurs plans.

Si la polarisation est différente sur les tronçons du trajet, on utilise la méthode du § 2.4.1 ainsi que l'équation (98), tant pour la polarisation horizontale que pour la polarisation verticale, pour obtenir les pourcentages de temps p_H et p_V pendant lesquels l'affaiblissement du signal utile est dépassé (voir la Note 1) respectivement pour la polarisation horizontale et pour la polarisation verticale. On utilise l'équation (98) pour calculer la longueur totale du trajet d_H pour les tronçons utilisant la polarisation horizontale et aussi pour calculer la longueur totale du trajet d_V pour les tronçons utilisant la polarisation verticale. On calcule ensuite le pourcentage de temps p pendant lequel l'affaiblissement donné est dépassé sur l'ensemble du trajet, à l'aide de l'équation (voir la Note 2):

$$p = \frac{p_H d_H + p_V d_V}{d_H + d_V} \quad \% \quad (99)$$

NOTE 1 – Étant donné qu'elle donne l'affaiblissement dépassé pendant un pourcentage de temps donné, la méthode du § 2.4.1 doit être inversée numériquement pour obtenir le pourcentage de temps pendant lequel une valeur donnée de l'affaiblissement est dépassée.

NOTE 2 – Si les tronçons du trajet sont loin d'être parallèles, on utilisera vraisemblablement une méthode analogue à celle proposée dans la Note 1 du § 2.4.6.4.1 afin d'améliorer la précision. Dans ce cas, il faudra utiliser cette méthode pour calculer séparément l'affaiblissement pour chaque polarisation.

2.4.7 Prévion 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:

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

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 (34) 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 la XPD

La discrimination contrapolaire (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 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:

Étape 1: Calculer:

$$XPD_0 = \begin{cases} XPD_g + 5 & \text{pour } XPD_g \leq 35 \\ 40 & \text{pour } XPD_g > 35 \end{cases} \quad (101)$$

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.

Étape 2: Évaluer la probabilité d'existence d'évanouissements par trajets multiples:

$$\eta = 1 - e^{-0,2(P_0)^{0,75}} \quad (102)$$

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).

Étape 3: Déterminer:

$$Q = -10 \log_{10} \left(\frac{k_{XP}\eta}{P_0} \right) \quad (103)$$

où:

$$k_{XP} = \begin{cases} 0,7 & \text{une antenne d'émission} \\ 1 - 0,3 \exp \left[-4 \times 10^{-6} \left(\frac{s_t}{\lambda} \right)^2 \right] & \text{deux antennes d'émission} \end{cases} \quad (104)$$

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.

Étape 4: Dédire le paramètre C de la formule:

$$C = XPD_0 + Q \quad (105)$$

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

$$P_{XP} = P_0 \times 10^{-\frac{M_{XPD}}{10}} \quad (106)$$

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

$$M_{XPD} = \begin{cases} C - \frac{C_0}{I} & \text{sans XPIC} \\ C - \frac{C_0}{I} + XPIF & \text{avec XPIC} \end{cases} \quad (107)$$

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

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

4.2 Prévision des interruptions 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:

$$XPD = U - V(f) \log_{10} CPA \quad \text{dB} \quad (108)$$

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:

$$U = U_0 + 30 \log_{10} f \quad (109)$$

$$\begin{aligned} V(f) &= 12,8 f^{0,19} & \text{pour } 8 \leq f \leq 20 \text{ GHz} \\ V(f) &= 22,6 & \text{pour } 20 < f \leq 35 \text{ GHz} \end{aligned} \quad (110)$$

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 (108).

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:

$$XPD_2 = XPD_1 - 20 \log_{10}(f_2/f_1) \quad \text{pour } 4 \leq f_1, f_2 \leq 30 \text{ GHz} \quad (111)$$

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 (110) est moins précise pour de grands écarts de fréquences. Elle est la plus précise lorsque XPD_1 et XPD_2 correspondent aux mêmes polarisations (horizontale ou verticale).

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

Étape 1: Déterminer l'affaiblissement sur le trajet, $A_{0,01}$ (dB), qui est dépassé pendant 0,01% du temps à partir de la formule (33).

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

$$A_p = 10^{((U - C_0/I + XPIF)/V)} \quad (112)$$

où U est obtenu à partir de la formule (109) et V à partir de la formule (110), 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 polarisation croisée pour le TEB de référence.

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

Étape 3: Déterminer les paramètres suivants:

$$m = \begin{cases} 23,26 \log_{10}[A_p/(0,12 A_{0,01})] & \text{si } m \leq 40 \\ 40 & \text{dans les autres cas} \end{cases} \quad (113)$$

et

$$n = (-12,7 + \sqrt{161,23 - 4m})/2 \quad (114)$$

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} .

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

$$P_{XPR} = 10^{(n-2)} \quad (115)$$

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.

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

$$\tau_m = 0,7 \left(\frac{d}{50} \right)^{1,3} \quad \text{ns} \quad (116)$$

où d est la longueur du trajet (km).

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

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

$$P_s = 2,15\eta \left(W_M \times 10^{-B_M/20} \frac{\tau_m^2}{|\tau_{r,M}|} + W_{NM} \times 10^{-B_{NM}/20} \frac{\tau_m^2}{|\tau_{r,NM}|} \right) \quad (117)$$

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).

Si seul le paramètre de système normalisé K_n est disponible, on peut calculer comme suit la probabilité d'interruption sélective dans l'équation (117):

$$P_s = 2,15\eta (K_{n,M} + K_{n,NM}) \frac{\tau_m^2}{T^2} \quad (118)$$

où:

- T : période (Bd) du système (ns)
- $K_{n,x}$: paramètre de système normalisé, x désignant soit des évanouissements avec phase minimale (M), soit des évanouissements avec phase non minimale (NM).

Les définitions des paramètres relatifs à la signature et la façon dont on obtient 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 les effets de l'évanouissement sélectif en fréquence et plus rapide résultant de la propagation par trajets multiples doivent tous être pris en compte dans la conception d'une liaison. Il existe un certain nombre de techniques disponibles pour atténuer ces effets, la plupart d'entre elles atténuant simultanément les deux types d'évanouissement. Ces mêmes techniques atténuent également fréquemment les diminutions de découplage de polarisation. Elles peuvent être classées dans la catégorie des techniques ne nécessitant pas une certaine réception ou émission en diversité, ou dans la catégorie des techniques nécessitant réellement une diversité.

Puisqu'il est souhaitable, pour des raisons économiques, d'éviter autant que possible de recourir à la diversité, on examine en premier lieu au § 6.1 les stratégies et techniques ne faisant pas appel à la diversité. Celles-ci conviennent également dans le cas des systèmes à diversité, et doivent être utilisées lorsque cela est possible, même si leur utilisation est peut-être moins nécessaire. Les techniques de diversité sont exposées au § 6.2.

6.1 Techniques sans diversité

Plusieurs techniques 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. On considérera avec profit que ces stratégies répondent à une ou plusieurs des stratégies suivantes:

Stratégie A: réduction de l'occurrence des «affaiblissements uniformes» importants dus aux mécanismes atmosphériques (étalement du faisceau, découplage d'antenne et trajets multiples dans l'atmosphère; voir le § 2.3);

Stratégie B: réduction de l'occurrence des réflexions de surface (c'est-à-dire sur la surface de la Terre) importantes;

Stratégie C: réduction du décalage temporel entre réflexions de surface et l'onde atmosphérique.

6.1.1 Augmentation de l'inclinaison du trajet

Les équipements devraient être installés afin de tirer parti, pour les liaisons, du terrain accidenté de manière à augmenter l'inclinaison du trajet (ce que l'on qualifie parfois de méthode «de haut en bas» («high-low»)), ce qui permettrait de mettre en œuvre la stratégie A susmentionnée et, dans une certaine mesure, la stratégie B. Conjointement à cette méthode il conviendrait d'utiliser davantage l'effet d'écran du terrain pour réduire les niveaux de réflexion de surface (stratégie B; voir le § 6.1.2), puisque les deux sont étroitement liés.

Lorsque des tours ou des pylônes sont déjà installés, on peut, pour répondre aux considérations susmentionnées, réduire la hauteur d'antenne à une extrémité du trajet dans la mesure où les règles de dégagement du § 2.2.2 sont respectées.

6.1.2 Réduction de l'incidence des réflexions de surface

Les équipements devraient, si possible, être installés de manière à réduire l'occurrence sur les liaisons des réflexions de surface spéculaires et diffuses importantes (ou au moins transformer les réflexions spéculaires importantes en réflexions diffuses de moindre importance); on réduirait ainsi l'occurrence des évanouissements par trajets multiples de surface et des distorsions (stratégie B). Il existe plusieurs

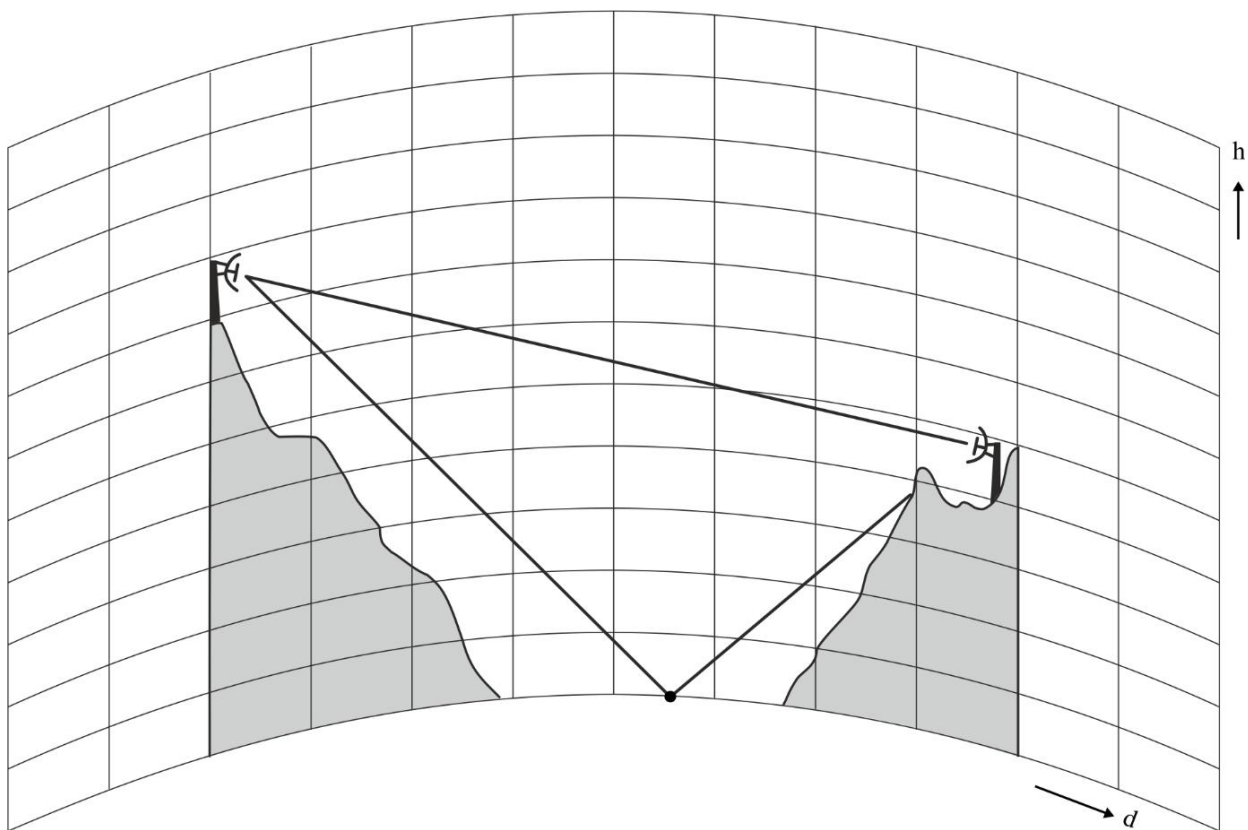
techniques à cet effet, dont la plupart sont liées les unes aux autres. Il convient donc de ne pas mettre en œuvre une technique sans tenir compte également des autres. Ces techniques font l'objet des paragraphes ci-après.

6.1.2.1 Effet d'écran du point de réflexion

Une technique consiste à profiter des collines, montagnes ou bâtiments présents le long du trajet pour protéger, par effet d'écran, les antennes des surfaces au sol présentant une réflexion spéculaire très importante (surfaces aquatiques, plaines, sommets de collines arrondis et déboisés, toits des bâtiments; voir la Fig. 9). Idéalement les collines et les montagnes devraient être recouvertes de végétation, afin de réduire encore le niveau du champ diffracté. On parvient bien sûr plus aisément à se protéger des surfaces de réflexion lorsque l'on diminue le dégagement du trajet (voir le § 6.1.3).

FIGURE 9

Exemple de la protection par effet d'écran d'une antenne vis-à-vis des réflexions spéculaires



Afin de trouver un obstacle écran approprié, il convient d'effectuer des analyses du trajet emprunté par les faisceaux pour une gamme de valeurs effectives du facteur k comprises entre k_e (99,9%) (ou une autre valeur minimale) et l'«infini» (voir § 2.2.2). On doit veiller à ce que la réflexion de surface soit occultée totalement ou partiellement pour des valeurs élevées ou médianes effectives de k . On perd bien évidemment dans une certaine mesure les avantages dus à l'effet d'écran par un obstacle écran si une ou plusieurs ondes réfléchies par la surface subissent une «superréfraction» sur les obstacles considérés puisque, dans ces conditions, la probabilité d'évanouissements par trajets multiples de surface et de distorsion est plus importante. Il faut également veiller à ce que la diffraction de l'onde directe soit acceptable compte tenu des critères de dégagement du trajet pour les valeurs effectives de k peu élevées correspondant aux conditions de sous-réfraction.

6.1.2.2 Déplacement du point de réflexion vers une surface peu réfléchissante

Une autre technique consiste à régler la hauteur de l'antenne à une des extrémités du trajet, ou aux deux extrémités, de façon à ce que les réflexions se produisent sur un terrain ou une surface végétale plus irrégulière. Dans le cas des trajets au-dessus de l'eau on peut régler l'inclinaison du trajet de telle sorte que la réflexion se produise sur le sol plutôt que sur l'eau, et de préférence sur un terrain boisé ou couvert d'une autre végétation. Le point de réflexion se rapproche d'une antenne que l'on abaisse et s'éloigne d'une antenne que l'on élève.

La méthode permettant de déterminer l'emplacement des zones de réflexion possibles est indiquée au § 6.1.2.3 (Étapes 1 à 3). Pour des trajets suffisamment courts, il convient d'utiliser la technique dans son intégralité pour déterminer si on peut choisir la hauteur d'une antenne, ou celle des deux de façon à éviter un brouillage destructif causé par des réflexions spéculaires de surface.

Les méthodes de calcul ou de mesure de l'intensité d'une réflexion spéculaire de surface font l'objet du § 6.1.2.4.

6.1.2.3 Choix optimal des hauteurs d'antenne

Dans le cas de trajets suffisamment courts, on peut parfois régler la hauteur d'une antenne ou celle des deux de façon à ce qu'aucune onde réfléchie en surface ne brouille l'onde directe de façon destructive pour les valeurs effectives de k significatives. Comme indiqué au § 6.1.2.2, on peut également régler les hauteurs d'antenne pour provoquer des réflexions sur une surface peu réfléchissante. La méthode étape par étape permettant d'appliquer les deux techniques, et de déterminer si la diversité est nécessaire, est décrite ci-après:

Étape 1: Calculer les hauteurs approximatives des antennes d'émission et de réception en utilisant la règle de dégagement relative aux systèmes en non-diversité (§ 2.2.2.1).

Étape 2: Calculer la hauteur de l'antenne d'émission et celle de l'antenne de réception la plus élevée au-dessus des zones possibles de réflexion spéculaire situées sur le profil du trajet ou à proximité de celui-ci. Des zones telles que des étendues d'eau, des plaines, le sommet arrondi de collines non boisé ou les toits de bâtiments peuvent être à l'origine de réflexions spéculaires importantes. Dans ces zones la surface réfléchissante n'est pas nécessairement horizontale, et un même trajet peut traverser plusieurs zones (voir la Note 1). Si l'on peut déterminer certaines zones à partir d'une carte, il faut pour d'autres procéder à un examen détaillé du terrain le long ou à proximité immédiate du trajet.

Les hauteurs h_1 et h_2 des antennes au-dessus d'une zone de réflexion présentant un angle d'inclinaison ν (voir la Note 1) sont exprimées de la manière suivante (voir la Fig. 10):

$$h_1 = h_{1G} + y_1 - y_0 + x_0 \times 10^3 \times \operatorname{tg} \nu \quad \text{m} \quad (119)$$

$$h_2 = h_{2G} + y_2 - y_0 - (d < x_0) \times 10^3 \times \operatorname{tg} \nu \quad \text{m} \quad (120)$$

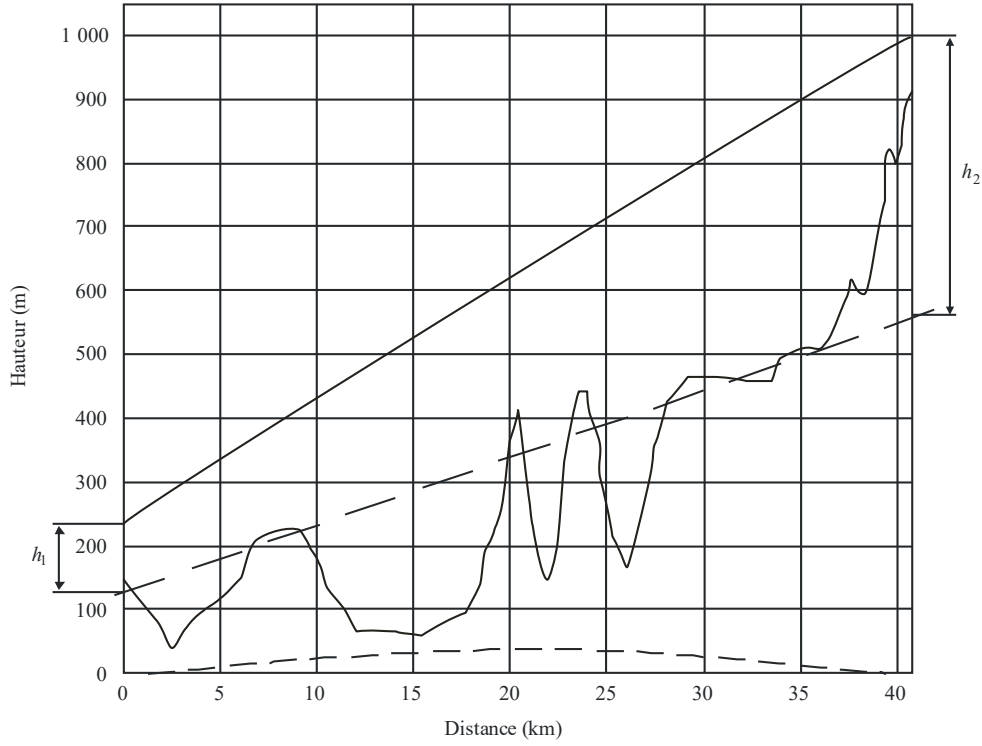
où:

- y_1, y_2 : altitudes du sol au-dessus du niveau de la mer pour les sites 1 et 2, respectivement (m)
- h_{1G}, h_{2G} : hauteurs des antennes au-dessus du sol pour les sites 1 et 2, respectivement (m)
- y_0 : altitude au-dessus du niveau de la mer du point central de la zone de réflexion (m)
- x_0 : distance entre le point central de la zone de réflexion et le site 1 (km).

Dans le cas d'une zone de réflexion maritime, il convient de tenir compte des variations induites par la marée.

FIGURE 10

Trajet le long d'un terrain réfléchissant



Étape 3: Pour une gamme de valeurs effectives du facteur k comprises entre k_e (99,9%) et l'infini (voir le § 2.2.2; dans la pratique, on peut choisir une grande valeur de k telle que $k = 1,0 \times 10^9$), calculer les distances d_1 et d_2 entre chaque surface de réflexion possible et les sites 1 et 2 (voir la Note 2):

$$d_1 = d(1 + b)/2 \quad \text{km} \quad (121)$$

$$d_2 = d(1 - b)/2 \quad \text{km} \quad (122)$$

où

$$b = 2 \sqrt{\frac{m+1}{3m}} \cos \left[\frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \arccos \left(\frac{3c}{2} \sqrt{\frac{3m}{(m+1)^3}} \right) \right] \quad (123)$$

$$m = \frac{d^2}{4a_e(h_1 + h_2)} \times 10^3 \quad (124)$$

$$c = (h_1 - h_2) / (h_1 + h_2) \quad (125)$$

avec $a_e = ka$ le rayon équivalent de la Terre pour un facteur k donné ($a = 6375$ km étant le rayon équivalent de la Terre); dans l'équation (120), d est en kilomètres et h_1 et h_2 en mètres.

Si l'on peut éviter les zones de réflexion spéculaires en réglant légèrement la hauteur d'une antenne ou celle des deux tout en respectant les règles de dégagement (Étape 1), évaluer la modification apportée et reprendre à l'Étape 2.

Étape 4: Pour les surfaces de réflexion spéculaires qui ne peuvent être évitées, calculer (en longueurs d'onde) la différence de longueur de trajet entre les ondes (ou «rayons») directe et indirecte, pour la même gamme de valeurs effectives de k :

$$\tau = \frac{2f}{0,3d} \left[h_1 - \frac{d_1^2}{12,74k} \right] \left[h_2 - \frac{d_2^2}{12,74k} \right] \times 10^{-3} \quad (126)$$

Chaque fois que le nombre de longueurs d'onde τ est un entier positif lorsque k varie (1, 2, etc.), le signal reçu passe par un minimum, ce qu'il faut éviter autant que possible. Plus le nombre de valeurs entières de $\tau_{max} - \tau_{min}$ est grand, lorsque k varie dans son intervalle, plus la probabilité est grande que la qualité de fonctionnement soit altérée et une certaine diversité est alors nécessaire.

Si $\tau_{max} - \tau_{min} < 1$ lorsque k varie dans l'intervalle voulu, la diversité peut être évitée de manière quasi certaine. Toutefois, pour des trajets de plus de 7,5 km environ, le meilleur moyen pour s'assurer que la protection par diversité n'est pas nécessaire est d'appliquer la méthode de calcul de l'occurrence de trajets multiples (§ 2.3) et la méthode de prévision des interruptions pour les systèmes numériques non protégés (§ 5.1). Dans tous les cas, il faut régler la hauteur d'une antenne ou celle des deux de façon à ce que $\tau \approx 0,5$ pour la valeur médiane de k .

Si $\tau_{max} - \tau_{min} \geq 1$, la profondeur des évanouissements par trajets multiples de surface et la nécessité éventuelle d'une diversité dépendent de l'intensité du signal réfléchi (voir les §§ 6.1.2.2 et 6.1.2.3) et la question de savoir si l'une des antennes ou les deux présentent une discrimination suffisamment importante vis-à-vis des réflexions de surface (voir le § 6.1.2.5). Il ne faut pas oublier toutefois que, sur des trajets suffisamment longs, les couches anormales présentant des gradients de réfractivité extrêmement négatifs peuvent provoquer l'évanouissement de l'onde directe par suite de l'étalement du faisceau, et que l'onde ou les ondes réfléchies en surface peuvent être simultanément renforcées en raison du fait que l'énergie de l'onde directe se propage en direction de la surface. Le meilleur moyen de déterminer si une certaine protection par diversité est nécessaire est d'appliquer la méthode de calcul de l'occurrence de trajets multiples (§ 2.3), ainsi que la méthode de prévision des interruptions pour les systèmes numériques non protégés (§ 5.1).

NOTE 1 – Puisque le profil du trajet est fondé sur un échantillon de hauteurs séparées par une distance donnée, la pente effective du terrain variera quelque peu entre les points correspondant sur le trajet. Il est suggéré d'autoriser une faible variation de l'angle d'inclinaison ν par rapport à la valeur estimée à partir du profil numérique (par exemple des valeurs de ± 10 m correspondant à des variations des hauteurs du profil à une extrémité du segment). On peut, si nécessaire, effectuer une inspection visuelle du trajet entre les points échantillon du terrain.

Dans certains cas pour lesquels le profil du trajet est quelque peu irrégulier et où une segmentation du trajet ne semble pas appropriée, il convient d'établir une courbe de régression le long du profil du trajet conformément aux indications du § 6.1.2.4.1, et de supposer que la réflexion se produit sur cette courbe afin de calculer les hauteurs au-dessus du point de réflexion et les distances à ce point. Dans ce cas, les étapes exposées dans le présent sous-paragraphe et dans le § 6.1.2.4.1 doivent être examinées conjointement.

NOTE 2 – Dans certains cas, il peut être souhaitable d'utiliser une valeur minimale effective de k inférieure à k_e (99,9%).

6.1.2.4 Choix de la polarisation verticale

Pour les trajets au-dessus de l'eau à des fréquences supérieures à environ 3 GHz, on a intérêt à choisir une polarisation verticale plutôt qu'horizontale. Aux angles rasants supérieurs à environ $0,7^\circ$, on peut espérer une réduction de la réflexion de surface de 2 à 17 dB par rapport à celle que présente une polarisation horizontale.

On peut obtenir par calcul ou par mesure une estimation plus précise du coefficient de réflexion équivalent de la surface intervenant dans la réflexion spéculaire comme on l'indique dans les paragraphes ci-après.

6.1.2.4.1 Calcul du coefficient de réflexion équivalent de surface

On peut calculer le coefficient de réflexion équivalent de surface à partir de la méthode pas-à-pas suivante (voir la Note 1).

Étape 1: Calculer la permittivité complexe de la surface terrestre η à proximité des zones de réflexion de surface:

$$\eta = \varepsilon_r - j18\sigma/f \quad (127)$$

où ε_r est la permittivité relative et σ est la conductivité (S/m). Évaluer les grandeurs ε_r et σ grâce aux informations figurant dans la Recommandation UIT-R P.527.

Étape 2: Calculer l'angle rasant φ pour la fourchette de valeurs équivalentes de k obtenue à l'Étape 3 du § 6.1.2.3:

$$\varphi = \frac{h_1 + h_2}{d} \left[1 - m(1 + b^2) \right] \quad (128)$$

Étape 3: Calculer le coefficient de réflexion de surface ρ pour la même fourchette de valeurs de k :

$$\rho = \left| \frac{\sin \varphi - \sqrt{C}}{\sin \varphi + \sqrt{C}} \right| \quad (129)$$

où:

$$C = \eta - \cos^2 \varphi \quad \text{polarisation horizontale} \quad (130)$$

$$C = \frac{\eta - \cos^2 \varphi}{\eta^2} \quad \text{polarisation verticale} \quad (131)$$

Étape 4: Calculer le facteur de divergence D de la surface terrestre:

$$D = \sqrt{\frac{1 - m(1 + b^2)}{1 + m(1 - 3b^2)}} \quad (132)$$

Étape 5: Calculer la longueur L_1 de l'ellipse de la première zone de Fresnel sur la surface de la Terre le long du trajet:

$$L_1 = d \sqrt{1 + \frac{4fh_1h_2 \times 10^{-2}}{3d}} \left[1 + \frac{f(h_1 + h_2)^2 \times 10^{-2}}{3d} \right]^{-1} \quad \text{km} \quad (133)$$

ainsi que la largeur, W_1 , suivant la direction transversale:

$$W_1 = \sqrt{\frac{3 \times 10^{-4} d}{f}} \quad \text{km} \quad (134)$$

où h_1 et h_2 sont exprimés en mètres et d en kilomètres. On suppose que l'ellipse de la première zone de Fresnel est centrée sur le point de réflexion géométrique d'une surface de la réflexion évidente (voir la Note 2).

Étape 6: Si, manifestement, une portion seulement de l'ellipse de la première zone de Fresnel produit une réflexion spéculaire, estimer la longueur Δx (km) de cette portion. Évaluer ensuite le facteur de réflexion spéculaire R_s (voir la Note 2):

$$R_s = \sqrt{\frac{f(h_1 + h_2)^4 (\Delta x)^2 \times 10^{-2}}{3h_1 h_2 d^3}} \quad (135)$$

où h_1 et h_2 sont là aussi exprimés en mètres, et d en kilomètres. On suppose par défaut que $R_s = 1$.

Étape 7: Si la surface intérieure à l'ellipse de la première zone de Fresnel est quelque peu irrégulière, évaluer le facteur d'irrégularité de surface R_r :

$$R_r = \sqrt{\frac{1 + (g^2 / 2)}{1 + 2,35(g^2 / 2) + 2\pi(g^2 / 2)^2}} \quad (136)$$

où:

$$g = \frac{40 \pi f \sigma_h \sin \varphi}{3} \quad (137)$$

σ_h (m) étant l'écart-type de la hauteur de la surface relativement à la courbe de régression sur la partie du profil de trajet située à l'intérieur de l'ellipse de première zone de Fresnel (voir la Note 3). On suppose par défaut que $R = 1$.

Étape 8: Calculer le coefficient de réflexion équivalent pour la fourchette voulue de valeurs équivalentes de k :

$$\rho_{eff} = \rho D R_s R_r \quad (138)$$

On peut ensuite estimer le niveau de l'onde ou des ondes réfléchies par rapport à l'onde directe grâce à la technique exposée au § 6.1.2.5.

NOTE 1 – Il est clair qu'il sera difficile d'obtenir, sur de nombreux trajets terrestres (en particulier aux fréquences élevées) une estimation précise du coefficient de réflexion apparente de surface du fait de diverses incertitudes (conductivité de la surface, irrégularité de la surface, etc.) ainsi que du degré de subjectivité actuellement inhérent au calcul. La méthode de calcul peut n'être dans ces situations qu'un guide approximatif permettant d'identifier les trajets problématiques ou de choisir un trajet plutôt qu'un autre, même si on ne doit pas négliger cette aide. En ce qui concerne la réflexion de surface au sol, il peut être souhaitable de supposer un sol humide dans les zones couramment humides aux périodes durant lesquelles on observe des évanouissements.

NOTE 2 – L'équation (135) conduit à de meilleurs résultats si aucun contour de la zone de réflexion spéculaire n'est trop éloigné du point de réflexion spéculaire. Il peut être préférable dans certains cas de subdiviser la première zone de Fresnel en une partie très irrégulière clairement non réfléchissante (à cause de l'angle élevé caractérisant le terrain ou du fait de l'effet d'écran du terrain), et en une autre partie moins irrégulière et donc partiellement réfléchissante, pour laquelle on calcule un facteur d'irrégularité de surface conformément à l'Étape 7 susmentionnée.

Indiquons à titre indicatif que si la zone réfléchissante sur la surface de la Terre couvre exactement la première zone de Fresnel le long du trajet, l'amplitude de l'onde réfléchie est de 2,6 dB supérieure à celle de l'onde directe (sans tenir compte des effets induits par le facteur de divergence D et de la discrimination d'antenne examinée au § 6.1.2.5). Cette valeur serait de 6 dB si la zone réfléchissante couvrait exactement la première zone de Fresnel non seulement dans sa dimension longitudinale, mais également dans sa dimension latérale. En revanche, si la zone réfléchissante ne contient pas le point géométrique de réflexion, l'amplitude relative de l'onde réfléchie ne dépassera pas -3,4 dB. Si elle est totalement disjointe de la première zone de Fresnel, l'amplitude relative de l'onde réfléchie sera inférieure à -11,5 dB.

NOTE 3 – Si le profil du trajet est suffisamment irrégulier, il peut être préférable d'établir une courbe de régression le long du trajet sur une longueur correspondant précisément à celle de la première zone de Fresnel, ce qui servira de base pour déterminer l'emplacement du point de réflexion puis calculer l'écart-type des hauteurs du profil σ_h (m) autour de cette courbe. L'emplacement initial de la première zone de Fresnel étant inconnu, le processus peut être itératif. On supposera une surface lisse si l'ellipse de la première zone de Fresnel est sur l'eau.

6.1.2.4.2 Mesure du coefficient de réflexion équivalent de surface

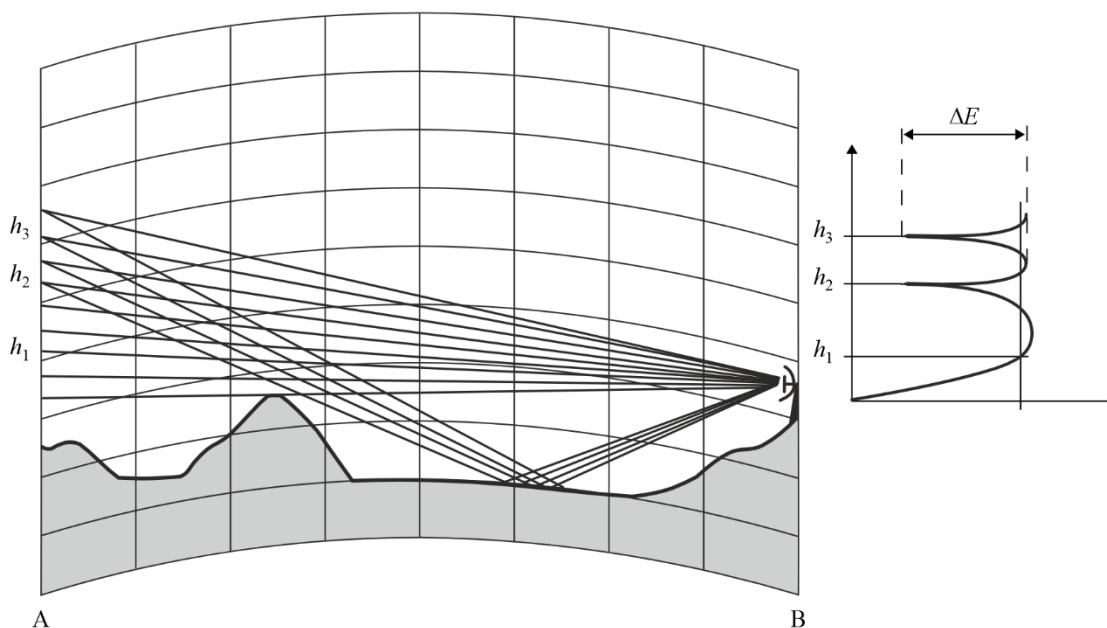
On peut mesurer dans des conditions de propagation normales (voir le § 8 relatif au meilleur moment de la journée, ainsi que la Note 1) le coefficient de réflexion équivalent de la surface réfléchissante en établissant le diagramme hauteur d'antenne – gain d'antenne relatif au niveau du signal reçu lorsqu'on règle la hauteur de l'antenne d'émission ou de l'antenne de réception dans une gamme suffisamment large pour observer tant les valeurs minimale que maximale du diagramme. Si ΔE (dB) est la différence entre les niveaux maximal et minimal (voir la Fig. 11), le coefficient de réflexion apparente est donné par:

$$\rho_{eff} = \frac{10^{\Delta E/10} + 1 - 2 \times 10^{\Delta E/20}}{10^{\Delta E/10} - 1} \quad (139)$$

NOTE 1 – La surface au sol peut être plus sèche durant la partie de la journée où l'on prévoit des conditions normales de propagation que durant la partie de la journée où l'on s'attend à des phénomènes de propagation par trajets multiples. Il peut alors être souhaitable d'introduire une correction fondée sur les équations du § 6.1.2.4.1 et sur les différences connues de la conductivité au sol dans des conditions humides ou sèches. Les §§ 6.1.2.4.1 et 6.1.2.4.2 ne fournissent que des indications sommaires à cet égard.

FIGURE 11

Mesure de ΔE (dB) à partir du diagramme hauteur d'antenne-gain d'antenne



P.0530-11

6.1.2.5 Utilisation de la discrimination d'antenne

Si les trajets sont suffisamment inclinés ou présentent un dégagement naturellement important, les angles entre l'onde directe et l'onde ou les ondes réfléchies par la surface de la Terre deviennent suffisamment importants pour tirer profit du diagramme de rayonnement d'une antenne ou des deux

antennes et permettre une discrimination vis-à-vis de l'onde ou des ondes réfléchies. Même sans cet avantage lié au terrain, il peut être bénéfique d'incliner une antenne ou les deux antennes légèrement vers le haut, afin d'accroître le pouvoir discriminant disponible. La méthode pas-à-pas correspondante est exposée ci-après.

Étape 1: Calculer les angles entre l'onde directe et l'onde ou les ondes réfléchies par la surface de la Terre au niveau des sites 1 et 2 pour la gamme voulue des valeurs effectives de k obtenues à l'Étape 3 du § 6.1.2.4:

$$\alpha_1 = \frac{180}{\pi} \left[\frac{h_1}{d_1} - \frac{h_1 - h_2}{d} - \frac{d_2}{12,74k} \right] \times 10^{-3} \quad \text{degrés} \quad (140)$$

$$\alpha_2 = \frac{180}{\pi} \left[\frac{h_2}{d_2} - \frac{h_2 - h_1}{d} - \frac{d_1}{12,74k} \right] \times 10^{-3} \quad \text{degrés} \quad (141)$$

Étape 2: Évaluer l'affaiblissement par rapport au signal direct du niveau du ou des signaux réfléchis par la surface de la Terre, du fait de la discrimination d'antenne (voir la Note 1):

$$L_a = 12 \left[\left(\frac{\alpha_1}{\alpha_{a1}} \right)^2 + \left(\frac{\alpha_2}{\alpha_{a2}} \right)^2 \right] \quad \text{dB} \quad (142)$$

où α_{a1} et α_{a2} sont les ouvertures de faisceau à mi-puissance des antennes.

Si l'angle ou les angles de l'onde ou des ondes réfléchies par la surface de la Terre sont situés dans la demi-ouverture de faisceau d'une antenne ou des deux antennes, il convient d'incliner vers le haut d'environ une demi-largeur de faisceau l'antenne ou les antennes concernées afin d'introduire une discrimination d'antenne supplémentaire (voir la Note 2). Même si l'angle d'incidence d'une onde réfléchi par la surface de la Terre est légèrement hors de la demi-ouverture de faisceau des antennes, il peut être judicieux de procéder à une légère inclinaison vers le haut (voir la Note 2). On peut alors évaluer l'affaiblissement total dû à la discrimination d'antenne (voir la Note 1):

$$L_a = 12 \left[\left(\frac{\alpha_1 + \alpha_{t1}}{\alpha_{a1}} \right)^2 + \left(\frac{\alpha_2 + \alpha_{t2}}{\alpha_{a2}} \right)^2 \right] \quad \text{dB} \quad (143)$$

où α_{t1} et α_{t2} sont les angles dont on a incliné les antennes vers le haut.

Étape 3: Il peut être utile pour certains trajets d'estimer ou de mesurer le coefficient de réflexion équivalent de surface pour obtenir une évaluation globale du niveau de la ou des réflexions de surface dans des conditions normales de propagation. On pourra à cet égard utiliser les informations figurant au § 6.1.2.4. L'affaiblissement global du niveau de l'onde ou des ondes réfléchies par la surface de la Terre est alors donné par:

$$L_s = L_a - 20 \log_{10} \rho_{eff} \quad \text{dB} \quad (144)$$

où L_a est obtenu selon le cas par l'équation (142) ou (143). Le coefficient de réflexion équivalent de surface pouvant être renforcé dans des conditions de trajets multiples de surface, il n'est pas crucial d'estimer précisément, ni même d'évaluer, les angles d'inclinaison vers le haut pour les antennes (voir l'Étape 5).

Étape 4: Si une antenne ou les deux antennes est (sont) inclinée(s) vers le haut, l'affaiblissement correspondant du niveau du signal direct dans des conditions normales de propagation ($k = 4/3$) est donné par (voir la Note 1):

$$L_d(k = 4/3) = 12 \left[\left(\frac{\alpha_{t1}}{\alpha_{a1}} \right)^2 + \left(\frac{\alpha_{t2}}{\alpha_{a2}} \right)^2 \right] \quad \text{dB} \quad (145)$$

Dans des conditions de superréfraction ou de sous-réfraction, on peut évaluer $L_d(k)$ de la façon suivante (voir la Note 1):

$$L_d(k) = 12 \left[\left(\frac{\alpha_{t1} - \alpha_d}{\alpha_{a1}} \right)^2 + \left(\frac{\alpha_{t2} - \alpha_d}{\alpha_{a2}} \right)^2 \right] \quad \text{dB} \quad (146)$$

l'angle d'incidence du signal direct étant approximativement donné par (voir la Note 2):

$$\alpha_d = -0,0045d \left(\frac{1}{k} - \frac{3}{4} \right) \quad \text{degrés} \quad (147)$$

Étape 5: La profondeur d'évanouissement maximale possible dans des conditions de propagation normales ($k = 4/3$) après brouillage destructif entre le signal direct et le ou les signaux réfléchis par la surface de la Terre peut être calculée de la manière suivante:

$$A_{max} = -20 \log_{10} (10^{-L_d/20} - 10^{-L_s/20}) \quad (148)$$

où L_d est donné par l'équation (145) et L_s par l'équation (144) (voir la Note 2). Dans des conditions de superréfraction ou de sous-réfraction pour lesquelles le signal direct subit également un affaiblissement supplémentaire de $0,5L_{add}$ (dû par exemple à un étalement du faisceau dans des conditions de superréfraction) et le signal réfléchi par la surface de la Terre un gain de $-0,5L_{add}$, la profondeur d'évanouissement maximale possible est donnée par:

$$A_{max} = -20 \log_{10} (10^{-(L_d+0,5L_{add})/20} - 10^{-(L_s-0,5L_{add})/20}) \quad \text{dB} \quad (149)$$

où L_d est donné par l'équation (146) et L_s par l'équation (144) (voir la Note 2).

On peut optimiser les angles d'inclinaison des antennes pour minimiser les évanouissements par trajets multiples de surface, la distorsion d'amplitude par trajets multiples de surface ou une combinaison de ces deux phénomènes. L'optimisation visant à la minimisation des évanouissements peut être réalisée en donnant à L_{add} dans l'équation (149) une valeur telle que L_d soit inférieur à L_s d'environ 0,3 dB pour $k = \infty$ (on choisira dans la pratique une très grande valeur de k , $k = 1 \times 10^9$ par exemple), et en minimisant A_{max} par le biais d'un choix empirique des angles d'inclinaison. En revanche, on peut donner à ρ_{eff} dans l'équation (144) une valeur proche de, ou supérieure à, 1,0 de façon à produire la même différence d'environ 0,3 dB (voir la Note 2), avant de procéder à l'optimisation. On évite ainsi le cas où ρ_{eff} est inconnu. Cette méthode induit une réduction de la marge de protection contre les évanouissements de l'ordre de 2,5 à 4 dB.

On peut minimiser de façon optimale la distorsion d'amplitude due aux trajets multiples de surface en accroissant encore les angles d'inclinaison jusqu'à maximiser la discrimination d'antenne vis-à-vis de l'onde ou des ondes réfléchies sur la surface de la Terre. Cela se produira lorsque la différence de discrimination entre l'onde directe et l'onde ou les ondes réfléchies sera maximale. Toutefois, pour optimiser de manière précise les angles d'inclinaison en fonction de la distorsion par trajets multiples de surface, il faut disposer des diagrammes d'antenne puisque le modèle de l'équation (143) est moins précis en dehors des demi-ouvertures de faisceau des antennes, en particulier à mesure que l'on

s'approche des bords du lobe principal (voir la Note 1). Puisque l'optimisation relative à la distorsion d'amplitude est réalisée en contrepartie d'une réduction supplémentaire de la marge de protection contre les évanouissements uniformes, on recommande d'augmenter dans les mêmes proportions les angles d'inclinaison obtenus suite à l'optimisation relative aux évanouissements, jusqu'à parvenir à une diminution maximum de la marge de protection contre les évanouissements d'environ 6 dB. Bien que les angles d'inclinaison résultants correspondent en fait à une optimisation moindre vis-à-vis des évanouissements proprement dits, l'accroissement de la profondeur des évanouissements ne se chiffre qu'à une fraction de décibel (voir la Note 3).

Il convient de noter qu'une discrimination optimale vis-à-vis des trajets multiples de surface obtenue par l'inclinaison de l'antenne ou des antennes vers le haut aura également tendance à accroître la discrimination relative aux trajets multiples dans l'atmosphère (voir la Note 4).

NOTE 1 – Cette approximation de faisceau de Gauss est plus précise dans l'ouverture de faisceau des antennes. À l'extérieur de cet angle, on peut utiliser des diagrammes d'antenne réels pour obtenir si on le souhaite une estimation plus précise, ce qui est particulièrement important à mesure que l'on s'approche des bords du lobe principal.

NOTE 2 – L'inclinaison vers le haut des antennes est souhaitable pour accroître la qualité de fonctionnement dans des conditions d'évanouissement par trajets multiples de surface, quel que soit le niveau de l'onde ou des ondes réfléchies de surface dans des conditions de propagation normales (par exemple, $k = 4/3$). L'objectif de la minimisation optimale des évanouissements est de réduire davantage le niveau de l'onde ou des ondes réfléchies de surface que celui de l'onde directe, tout en diminuant ce dernier niveau d'une quantité juste suffisante pour minimiser la profondeur totale des évanouissements. L'objectif de la minimisation optimale de la distorsion d'amplitude est de rendre maximale la différence relative entre l'amplitude de l'onde directe et celle de l'onde ou des ondes réfléchies de surface au prix d'un léger accroissement de la profondeur maximale des évanouissements. On peut réaliser ces deux optimisations en modifiant les angles d'incidence de l'onde ou des ondes réfléchies de surface de manière qu'ils correspondent à des points du diagramme d'antenne présentant des gains moins élevés. Si nécessaire, l'affaiblissement de la marge de protection contre les évanouissements uniformes dans des conditions normales, consécutif à l'affaiblissement de la discrimination d'antenne en direction de l'onde directe résultant de l'inclinaison vers le haut de l'antenne, peut être compensé par un accroissement de la taille des antennes.

Les angles d'inclinaison d'antenne permettant de minimiser l'effet des réflexions de surface dans des conditions normales de propagation dépendront de la géométrie du trajet, de l'ouverture de faisceau d'antenne et du niveau relatif des réflexions de surface. Bien que l'angle d'inclinaison à utiliser dans des conditions de propagation normales augmente lorsque s'accroît l'ouverture de faisceau, on constate une diminution du rapport nécessaire entre l'angle d'inclinaison et l'ouverture de faisceau à mesure que s'accroît cette ouverture.

Les angles d'inclinaison d'antenne permettant de minimiser l'effet des réflexions de surface dans des conditions de trajets multiples de surface seront supérieurs à ceux correspondant à des conditions normales de propagation; on choisira généralement des valeurs d'angles correspondant à des conditions de trajets multiples. Lorsqu'une couche extrême, telle qu'un conduit, provoque un affaiblissement, par étalement du faisceau, du niveau du signal direct, le risque d'un renforcement simultané du signal ou des signaux réfléchis en surface s'accroît, ce qui conduit à d'importants évanouissements par trajets multiples. On observera également un accroissement de la distorsion de propagation.

On peut effectuer une simulation conforme aux indications de l'Étape 5 pour choisir les angles d'inclinaison permettant de minimiser la profondeur d'évanouissement que décrit l'équation (149). (La diminution éventuelle à moins de 0,3 dB de l'écart entre L_d et L_s obtenue en modifiant l'une ou l'autre de ces valeurs, ou les deux, ne semble pas avoir d'incidence critique sur le résultat.) Les angles d'inclinaison optimaux varieront en fonction des angles des ondes réfléchies de surface donnés par les équations (140) et (141). Les angles d'inclinaison d'antenne les plus grands correspondent aux angles de réflexion de surface les plus importants. Comme indiqué précédemment, la diminution de

marge typique, pour les angles d'inclinaison optimaux, varie entre 2,5 et 4 dB. Dans tous les cas, si l'on accroît les tailles d'antenne pour compenser la diminution de la marge de protection contre les évanouissements uniformes, on doit alors procéder à une nouvelle optimisation pour déterminer les nouveaux angles d'inclinaison optimaux.

Comme on l'a déjà noté, la minimisation optimale de la distorsion d'amplitude doit être précédée par l'étape permettant de minimiser l'évanouissement et d'accroître dans les mêmes proportions les angles d'inclinaison. L'utilisation de l'un ou l'autre ensemble d'angles d'inclinaison ou d'une combinaison de ces deux ensembles dépendra de considérations relatives au système (voir la Note 3).

Notons qu'une partie de la réduction de la discrimination d'antenne en direction du «rayon» de plus forte intensité (il s'agit généralement de l'onde directe) résultant de l'inclinaison d'antenne et correspondant à des conditions de trajets multiples de surface, est compensée par le fait que ce rayon présente généralement un angle d'incidence positif.

NOTE 3 – Lorsque l'on peut éviter d'accroître la taille d'antenne en optimisant les angles d'inclinaison d'antenne de manière à minimiser la profondeur maximale des évanouissements (au prix, donc, d'une réduction de 2,5-4 dB de la marge de protection contre les évanouissements) cette solution peut être la plus intéressante. En revanche, si l'optimisation des angles d'inclinaison effectuée pour minimiser l'amplitude de distorsion se traduit par une augmentation de la qualité de fonctionnement suffisante pour éviter un recours à la diversité, on pourra préférer cette dernière solution. Le choix, en l'occurrence, dépendra de la qualité de l'égalisation utilisée dans le système. Une troisième solution consisterait à choisir des angles d'inclinaison d'antenne conduisant à une perte de la marge de protection contre les évanouissements uniformes comprise entre les valeurs extrêmes 2,5-4 dB et environ 6 dB. Il est important d'observer qu'une minimisation optimale de la distorsion conduit à ne s'écarter que faiblement des conditions d'évanouissement optimales (c'est-à-dire une profondeur des évanouissements minimale).

NOTE 4 – Tant les analyses de tracé de rayons que les mesures expérimentales approfondies des angles d'incidence et des amplitudes des trois ondes de trajets multiples de plus grande intensité indiquent que c'est l'onde de trajets multiples dans l'atmosphère qui présente l'angle d'incidence le plus important qui est généralement la plus intense. Ainsi, aussi longtemps que l'on choisit des angles d'incidence supérieurs à l'angle d'incidence le plus important (moins de $0,3^\circ$ en général pour des longueurs de trajet comprises entre 31 et 51 km), on augmentera également la discrimination d'antenne vis-à-vis des trajets multiples dans l'atmosphère. Ainsi, l'optimisation de l'inclinaison d'antenne vers le haut devra en général être fondée sur la minimisation des effets consécutifs à la propagation par trajets multiples de surface.

6.1.3 Réduction du dégagement du trajet

Une autre méthode, moins bien comprise ou quantifiée que les autres procédures, consiste à réduire le dégagement du trajet pour induire une quantité prévisible d'affaiblissement par diffraction, au moins dans des conditions de sous-réfraction. On pense que cette technique est efficace surtout parce que:

- elle réduit la probabilité et/ou l'intensité de l'affaiblissement par l'étalement du faisceau que subit l'onde directe du fait d'une couche extrême (telle qu'un conduit) se situant immédiatement ou partiellement sous la longueur totale du trajet (stratégie A); et
- elle réduit simultanément la probabilité que cette même couche renforce les réflexions de surface (stratégie B).

Donc la probabilité que l'onde directe se combine de manière destructive avec une ou plusieurs réflexions de surface pour provoquer un évanouissement important sélectif en fréquence.

Une autre raison incitant à croire en l'efficacité de la méthode réside dans le fait que les retards entre l'onde directe et l'onde ou les ondes brouilleuses réfléchies sur la surface de la Terre sont réduits si la couche extrême provoquant l'étalement du faisceau de l'onde directe n'est que partiellement située sous le trajet (stratégie C), de sorte que l'évanouissement sélectif en fréquence est moins important que si la couche était tout entière située sous le trajet.

Cette technique appelle un compromis entre la réduction des effets des évanouissements par trajets multiples de surface, d'une part, et l'accroissement des évanouissements dus à l'affaiblissement par diffraction dans des conditions de sous-réfraction, d'autre part. La règle de dégagement du trajet dont il est question au § 2.2.2.1 est conçue pour éviter un affaiblissement par diffraction dans des conditions de réfraction normales (c'est-à-dire une valeur médiane équivalente du facteur k) tout en permettant un affaiblissement par diffraction d'environ 6 dB dans des conditions correspondant à k_e (99,9%). Pour les systèmes présentant des marges de protection contre les évanouissements uniformes suffisamment importantes, on pourrait en principe accepter un affaiblissement par diffraction plus important tant dans des conditions normales que dans des conditions de sous-réfraction.

Cette technique est du plus grand intérêt pour des trajets présentant peu ou pas d'inclinaison. Cependant, même pour des trajets présentant une certaine inclinaison, il peut être utile de réduire le dégagement du trajet afin de diminuer encore les effets des trajets multiples de surface.

Cette technique est appliquée plus sûrement à l'antenne la moins élevée dans une configuration à diversité d'espace, et il est recommandé de l'utiliser d'office dans l'approche présentée au § 6.2.1.

6.2 Techniques avec diversité

Ces techniques comprennent la diversité d'espace, la diversité angulaire et la diversité de fréquence. En règle générale, il convient d'éviter d'utiliser la diversité de fréquence et de préférer la diversité d'espace, la diversité angulaire ou une combinaison de ces deux techniques. L'utilisation du spectre des fréquences est ainsi beaucoup plus efficace et, en outre, ces techniques sont généralement supérieures. La diversité d'espace, en particulier, permet de lutter contre les évanouissements uniformes (par exemple ceux causés par l'affaiblissement d'étalement des faisceaux et non pas par les affaiblissements atmosphériques dus à la propagation par trajets multiples avec temps de propagation relatif court) ainsi que les affaiblissements sélectifs en fréquence, alors que la diversité de fréquence ne permet de lutter que contre les évanouissements sélectifs en fréquence (ceux causés par l'affaiblissement de surface dû à la propagation par trajets multiples et/ou les affaiblissements atmosphériques dus à la propagation par trajets multiples). Il convient d'éviter d'utiliser la diversité de fréquence chaque fois que cela est possible, afin d'économiser le spectre. Chaque fois que l'on utilise la diversité d'espace, il convient également de recourir à la diversité angulaire en dépointant les antennes vers le haut, à des angles différents. La diversité angulaire peut également être utilisée dans les situations où la diversité d'espace n'est pas 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:

$$I = p(A) / p_d(A) \quad (150)$$

où $p_d(A)$ est le pourcentage de temps pendant lequel le signal combiné de diversité connaît simultanément une profondeur d'évanouissement 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 Espacement des antennes dans les systèmes à diversité d'espace

L'espacement nécessaire entre antennes dans les systèmes à diversité d'espace est déterminé par trois facteurs:

- la nécessité de maintenir un dégagement aussi faible que possible pour l'antenne la moins élevée (dans le cadre des directives relatives au dégagement exposées au § 2.2.2) de façon à minimiser l'occurrence des évanouissements dus à des trajets multiples sur la surface de la Terre (voir le § 6.1.3);
- la nécessité d'obtenir un facteur spécifié d'amélioration de diversité d'espace pour les trajets au-dessus de l'eau (voir le § 6.2.2); et
- la nécessité de minimiser le risque qu'un signal parvenant à une antenne de diversité subisse un évanouissement par une propagation en trajets multiples sur la surface de la Terre lorsque l'autre antenne subit déjà un évanouissement.

La procédure pas à pas pour déterminer l'espacement est la suivante:

Étapes 1 à 4: Appliquer les Étapes 1 à 4 du § 6.1.2.3 pour déterminer:

- s'il existe une zone de trajet pouvant présenter une réflexion spéculaire de surface importante;
- si la diversité d'espace visant à réduire les évanouissements dus à la propagation par trajets multiples de surface est nécessaire.

(Voir la Note 1 pour le cas des bonds à deux segments par réflecteurs passifs avec un ou plusieurs réflecteurs à proximité immédiate.) S'il n'y a pas de zones importantes de réflexion spéculaire de surface, passer directement à l'Étape 8.

Étape 5: Pour la gamme de valeurs équivalentes de k utilisée à l'Étape 3, calculer les distances entre deux minima ou deux maxima adjacents du signal reçu (consécutifs au brouillage entre l'onde directe et l'onde résultant de la propagation par trajets multiples de surface; voir la Fig. 11):

$$\theta_2 = \frac{150d}{f(h_1 - d_1^2 / 12,74k)} \quad \text{m} \quad (151)$$

On peut calculer la distance θ_1 au niveau du site 1 en remplaçant respectivement h_1 et d_1 dans l'équation (151) par h_2 et d_2 .

Reprendre cette étape pour toutes les zones de réflexion spéculaire possibles.

Étape 6: Calculer les espacements optimaux possibles des antennes de diversité pour la gamme de valeurs de k susmentionnée.

$$S_1 = \theta_1 / 2, 3\theta_1 / 2, 5\theta_1 / 2 \text{ etc.} \quad S_2 = \theta_2 / 2, 3\theta_2 / 2, 5\theta_2 / 2 \text{ etc.} \quad \text{m} \quad (152)$$

Reprendre à nouveau cette étape pour toutes les zones de réflexion spéculaire possibles.

Étape 7: Trajets présentant des réflexions spéculaires de surface évidentes: Calculer une hauteur approximative de l'antenne de diversité à partir des Étapes 2-3 du § 2.2.2.2, ainsi que l'espacement approximatif résultant S'_1 entre les antennes. Comparer cet espacement approximatif avec les espacements optimaux obtenus à l'Étape 6 pour la gamme voulue des valeurs équivalentes de k .

Dans les cas de trajets pour lesquels on s'attend à un niveau de signal réfléchi en surface proche de celui du signal direct dans des conditions normales de réfraction (ce qui correspond à la valeur médiane de k ou à $k = 4/3$), il convient de choisir comme espacement effectif la valeur minimale optimale obtenue à l'Étape 6 (c'est-à-dire $S_1 = \theta_1 / 2$) pour la valeur médiane de k (voir la Note 2). On parviendra ainsi à une protection par diversité d'espace valable pour la gamme de valeurs de k la plus grande possible. (Aux basses fréquences, il peut être nécessaire d'accroître la hauteur de l'antenne supérieure ne serait-ce que pour parvenir à cet espacement minimal optimal.)

Dans le cas des trajets pour lesquels le niveau du signal ou des signaux réfléchis en surface ne devrait pas être proche de celui du signal direct dans des conditions normales de réfraction (voir les §§ 6.1.2.4 et 6.1.2.5 pour déterminer si cela est le cas), il est possible d'utiliser une autre méthode, consistant à choisir l'un des espacements optimaux les plus grands donnés par l'équation (152) (par exemple, $S_1 = 3\theta_1/2$ ou $5\theta_1/2$) pour la valeur médiane de k , de manière à approcher la valeur de S'_1 mais sans l'atteindre. On réduira ainsi l'occurrence des évanouissements par trajets multiples de surface tout en conservant une protection par diversité d'espace relativement importante vis-à-vis de ces éventuels évanouissements. Il faut évaluer l'avantage que constitue la diminution d'occurrence des évanouissements dus à la propagation par trajets multiples de surface au regard de l'utilisation d'un espacement non optimal pour une gamme de valeurs de k aussi large (voir la Note 3).

Comme on l'indique au § 2.2.2.2, il peut être nécessaire pour certains longs trajets (en général au-dessus de l'eau) d'utiliser trois antennes de diversité d'espace. Dans ce cas, l'espacement entre l'antenne supérieure et l'antenne du milieu doit correspondre à la plus petite valeur optimale possible tirée de l'équation (152). La hauteur de l'antenne la moins élevée doit être fondée sur la règle de dégagement indiquée au § 2.2.2.2 (voir la Note 4).

Étape 8: Trajets sans réflexion spéculaire de surface évidente: Calculer la hauteur de l'antenne de diversité selon les Étapes 2-3 du § 2.2.2.2.

Une fois obtenu l'espacement d'antenne de diversité, effectuer les calculs d'amélioration de diversité et d'interruption en utilisant les méthodes des § 6.2.1 et § 6.2.2. Si l'espacement de diversité est supérieur à la limite $S = 23$ m de l'équation (152), procéder au calcul en utilisant cette limite, puisque l'amélioration réelle avec un espacement plus grand serait en fait plus importante. Au besoin, calculer la nouvelle hauteur pour l'antenne supérieure afin de satisfaire au critère d'interruption.

Dans la plupart des cas, si l'on a déterminé le dégagement du trajet pour l'antenne inférieure de manière à minimiser l'occurrence d'un étalement du faisceau de l'onde directe et des évanouissements par trajets multiples de surface résultants, il ne sera pas nécessaire d'accroître la hauteur de l'antenne supérieure.

NOTE 1 – Dans le cas de bonds à deux segments par réflecteurs passifs avec un ou plusieurs réflecteurs passifs à proximité immédiate, on suggère que chaque segment soit d'abord traité comme une liaison indépendante afin de déterminer l'espacement des antennes de diversité à chaque extrémité. S'il n'y a aucune réflexion spéculaire de surface évidente, l'espacement calculé pour le segment le plus long sera également utilisé pour le segment le plus court.

NOTE 2 – Ces trajets correspondront pour la plupart au cas où l'onde est réfléchie sur l'eau et n'est pas interrompue dans des conditions normales, et où l'angle entre l'onde directe et l'onde réfléchie au niveau des deux antennes se situe à l'intérieur de l'ouverture à 3 dB du faisceau. Les trajets au-dessus de la terre pour lesquels la réflexion se produit sur une surface terrestre très lisse (par exemple, une plaine humide ou enneigée) pourraient également convenir.

NOTE 3 – On considère qu'il s'agit là du cas où l'avantage d'une diminution de l'occurrence des évanouissements par trajets multiples de surface est le plus important. De telles occurrences devraient avoir pour origine un conduit au sol ou une couche extrême présentant un important gradient de réfraction négatif et situé immédiatement ou partiellement sous le trajet. Dans ces conditions, les valeurs équivalentes de k inférieures à la valeur médiane ne seront pas pertinentes. Dans tous les cas, on se fondera sur la valeur médiane équivalente de k pour estimer l'espacement optimal entre les antennes.

NOTE 4 – Si l'on peut faire en sorte que l'espacement entre l'antenne du milieu et l'antenne la moins élevée soit conforme aux équations (152), après un léger ajustement selon la règle de dégagement du § 2.2.2.2, on obtiendra un avantage supplémentaire en termes de qualité de fonctionnement.

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

On peut combiner la diversité d'angle et la diversité d'espace afin d'accroître encore, au besoin, la qualité de fonctionnement. On incline les antennes de diversité d'espace pour parvenir à ce renforcement de la diversité d'angle. La méthode permettant de déterminer les angles d'inclinaison dans le cas d'une paire d'antennes de diversité d'espace ou dans le cas d'une paire d'antennes de diversité d'angle placées côte à côte est la suivante.

Étape 1: Incliner vers le haut l'antenne principale (la plus élevée) appartenant à la paire d'antennes de diversité d'espace (ou l'une des antennes de la paire d'antennes de diversité d'espace placées côte à côte) ainsi que l'antenne d'émission suivant des angles déterminés selon les procédures exposées au § 6.1.2.5 (voir la Note 1). On parviendra ainsi à une diminution de la marge de protection contre les évanouissements uniformes d'environ 2,5 à 6 dB, suivant le type d'optimisation choisi (minimisation des évanouissements ou de la distorsion d'amplitude). Utiliser si nécessaire une antenne plus large pour compenser cette diminution de la marge de protection contre les évanouissements uniformes.

Étape 2: Incliner l'antenne de diversité (la moins élevée) de la paire d'antennes de diversité d'espace (ou de l'autre antenne appartenant à une paire d'antennes de diversité d'angle situées côte à côte) vers le bas par rapport à l'horizon local d'un angle correspondant au minimum de:

- l'angle en direction de la réflexion spéculaire dominante le long du trajet (lorsque $k = \infty$); et de
- l'angle correspondant à un affaiblissement de 3 dB par rapport à l'axe de visée (voir la Note 2).

On peut choisir un angle de pointage de compromis s'il existe plusieurs réflexions spéculaires importantes le long du trajet. S'il n'y pas de réflexion spéculaire évidente, on pourra choisir un angle correspondant à la direction de la réflexion diffuse estimée la plus importante (émanant donc du terrain et/ou de la végétation). On pointera sinon dans les conditions normales cette antenne en direction de la ligne de visibilité directe, ou vers l'horizon si cette ligne est obstruée.

NOTE 1 – Notons que les angles d'inclinaison optimaux pour les antennes d'émission et de réception ne seront les mêmes qu'en cas d'égalité des hauteurs d'antenne au-dessus du point de réflexion de surface le long du trajet. L'angle d'inclinaison le plus important correspond à l'antenne présentant l'angle le plus grand en direction de la réflexion de surface (voir le § 6.1.2.5).

NOTE 2 – Le principal objectif recherché ici est double:

- parvenir à une combinaison des niveaux des signaux direct et réfléchi en surface qui soit significativement différente de celle de l'antenne supérieure de manière à maximiser les effets de diversité d'angle, et
- fournir une protection par diversité supplémentaire dans des conditions d'évanouissements uniformes importants consécutives à un étalement du faisceau de l'onde directe dans un ou plusieurs conduits le long du trajet (ce qui signifie que dans ces situations, le niveau du signal réfléchi en surface, que l'on a volontairement renforcé, a plus de chances de rester au-dessus du seuil de bruit).

La limite à 3 dB a pour objet d'éviter une trop grande diminution du niveau du signal direct parvenant à l'antenne de diversité, particulièrement lorsque la réflexion spéculaire dominante se produit immédiatement devant cette antenne.

Notons que l'angle d'inclinaison résultant peut être positif par rapport à la ligne de visibilité directe dans des conditions normales, en particulier si le signal direct parvenant à l'antenne de diversité subit un affaiblissement par diffraction important dans de telles conditions (antenne dite «enfouie»).

6.2.3 Espacement en fréquence dans les systèmes à diversité de fréquence

Les éléments figurant dans le présent paragraphe correspondent aux situations, peu nombreuses, où la diversité de fréquence pourrait s'avérer intéressante pour des raisons de nécessité, de commodité ou éventuellement en combinaison avec la diversité d'espace ou la diversité angulaire.

L'espacement en fréquence approprié entre le canal principal et le canal de protection pour les systèmes à diversité de fréquence est régi par trois facteurs:

- le plan de fréquences disponible applicable au système (voir les Recommandations UIT-R de la Série F);
- la nécessité d'obtenir un facteur d'amélioration de diversité de fréquence donné pour les trajets terrestres (voir le § 6.2.5.2);
- l'intérêt de limiter au strict minimum le risque que le signal sur une fréquence s'évanouisse en même temps que le signal sur l'autre fréquence sur des trajets où les phénomènes de réflexion sont importants.

La méthode progressive pour déterminer l'espacement en fréquence est la suivante:

Étapes 1 à 4: Appliquer les Étapes 1 à 4 du § 6.1.2.3 pour déterminer si:

- il y a des zones sur le trajet où les réflexions spéculaires de surface pourraient être importantes;
- il est nécessaire de recourir à la diversité de fréquence pour lutter contre les évanouissements de surface dus à la propagation par trajets multiples. S'il n'y a pas de zones où les réflexions spéculaires de surface sont importantes, passer à l'Étape 8.

Étape 5: Pour la même fourchette de valeurs efficaces de k à l'Étape 3, calculer l'espacement en fréquence optimal minimal entre le canal principal et le canal de protection, comme suit:

$$\Delta f_{min} = \frac{7,5 \times 10^4 d}{\left(h_1 - \frac{d_1^2}{12,74k} \right) \left(h_2 - \frac{d_2^2}{12,74k} \right)} \quad \text{MHz} \quad (153)$$

où, h_1 et h_2 sont en mètres et d , d_1 et d_2 en kilomètres. Passer par cette étape pour chaque zone où il peut y avoir des réflexions spéculaires.

Étape 6: Calculer les espacements en fréquence optimaux possibles entre le canal principal et le canal de protection, comme suit:

$$\Delta f = \Delta f_{min}, 3\Delta f_{min}, \text{ etc.} \quad \text{MHz} \quad (154)$$

Là aussi, procéder à cette étape pour chaque zone où il peut y avoir des réflexions spéculaires.

Étape 7: Trajets avec des réflexions spéculaires de surface évidentes: Pour les trajets sur lesquels le niveau du signal principal réfléchi à la surface devrait être voisin de celui du signal direct dans des conditions de réfractivité normales (c'est-à-dire valeur médiane de k ou $k = 4/3$), l'espacement en fréquence optimal minimum obtenu dans l'Étape 5 serait l'espacement idéal (voir la Note 1). La protection par diversité de fréquence sera ainsi assurée pour la plus grande fourchette de valeurs de k . Bien sûr, concrètement, la valeur de l'espacement en fréquence devra être un compromis entre cette valeur idéale et ce qui est possible, compte tenu du plan de fréquences existant. Toute modification par rapport à la valeur idéale pour tenir compte du plan de fréquences disponible devra se rapprocher de la valeur minimale obtenue à partir de l'équation (153) avec $k = \infty$. Toutefois, il faut souligner que la valeur effective de l'espacement en fréquence ne doit pas nécessairement être égale à la valeur optimale pour obtenir une certaine protection par diversité de fréquence. La méthode du § 6.2.5.2 peut être utilisée à titre indicatif, même pour les trajets subissant des phénomènes de réflexion.

Pour les trajets sur lesquels le niveau du ou des signaux réfléchis à la surface ne devrait pas être voisin de celui du signal direct dans des conditions de réfractivité normales (voir les §§ 6.1.2.4 et 6.1.2.5 pour déterminer si tel est le cas), une autre méthode pourrait être utilisée dans un petit nombre de cas. Elle consiste à choisir l'un des espacements de fréquence optimaux importants (voir l'équation (154)) pour la valeur médiane de k si le plan de fréquences et les paramètres du trajet (par exemple des hauteurs d'antenne, h_1 et/ou h_2 au-dessus de la surface de réflexion qui ne soient pas exagérément grandes) le permettent ou si l'on a recours à la diversité par fonctionnement en bandes croisées. Le fait d'utiliser un espacement de fréquence plus important que la valeur optimale minimale présente un inconvénient: l'efficacité ne sera pas aussi grande sur une fourchette aussi large de valeurs effectives de k (voir la Note 2).

Pour les bonds comportant un ou plusieurs répéteurs passifs et composés de deux ou plus de deux tronçons distincts, il convient d'appliquer l'équation (153) séparément à chaque tronçon sur lequel on observe des réflexions spéculaires évidentes et ajouter les contributions de chaque tronçon pour obtenir la valeur totale de Δ_{\min} . Les tronçons sur lesquels il n'y a pas, manifestement, de réflexions spéculaires ne devraient pas être pris en compte dans le calcul de cette somme.

Étape 8 – Trajets sans réflexions spéculaires de surface évidentes: Calculer l'amélioration de diversité selon la méthode du § 6.2.5.2 et adapter l'espacement de fréquence de façon à limiter au strict minimum les interruptions, compte tenu des contraintes du plan de fréquences.

NOTE 1 – Ces trajets seront essentiellement ceux où l'onde réfléchi à la surface est celle réfléchi sur l'eau et n'est pas occultée dans des conditions normales et où l'angle entre l'onde directe et l'onde réfléchi au niveau des deux antennes se situe dans l'ouverture à mi-faisceau à 3 dB. Les trajets terrestres où l'onde est réfléchi sur une surface très régulière (par exemple une plaine humide ou couverte de neige) peuvent aussi être pris en compte. Dans les deux cas, les espacements optimaux les plus petits correspondent aux trajets courts où les hauteurs d'antenne au-dessus de la surface de réflexion sont importantes.

NOTE 2 – Pour les trajets où il y a plus d'un signal significatif réfléchi par la surface, en particulier pour les trajets pour lesquels les niveaux sont grosso modo comparables, il faudra trouver une sorte de compromis entre les divers espacements de fréquence idéaux prévus et ceux dont on dispose compte tenu du plan de fréquences. Là aussi, il faut souligner que l'utilisation d'espacements de fréquence plus petits que les espacements de fréquence idéaux permettra d'obtenir une certaine protection par diversité.

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

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 avec le carré du coefficient de corrélation des évanouissements non sélectifs (k_{ns,s^2}) au moyen de la formule:

$$k_{ns,s}^2 = \exp \left(- 0.0004 \times S^{0.87} f^{-0.12} d^{0.48} p_0^{-0.04} \eta^{-1} \right) \quad (155)$$

Le facteur d'amélioration due à la diversité est calculé comme suit:

$$I = \left(\frac{100\eta}{p_0} \right) \left[1 - k_{ns,s}^2 \left(1 - \frac{p_0}{100\eta} 10^{-A_{A0}} \right) \right] 10^{(A-V)A_0} \quad (156)$$

où:

$$V = |(G_1 - L_1) - (G_2 - L_2)| \quad (157)$$

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 (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_1, L_2 : Affaiblissements des connexions entre les antennes et les points d'entrées récepteurs (dB).

L'équation (155) 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 la formule (7). L'équation (155) est valable dans le domaine des évanouissements profonds pour lequel la formule (7) s'applique.

6.2.5 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.

6.2.5.1 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.

Étape 1: Calculer la probabilité d'existence d'évanouissements par trajets multiples η comme à l'Étape 2 du § 4.1.

Étape 2: Calculer le carré du coefficient de corrélation des évanouissements non sélectifs, k_{ns} , au moyen de la formule (155):

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

$$k_s^2 = \begin{cases} 0,8238 & \text{pour } r_w \leq 0,5 \\ 1 - 0,195 (1 - r_w)^{0,109 - 0,13 \log_{10} (1 - r_w)} & \text{pour } 0,5 < r_w \leq 0,9628 \\ 1 - 0,3957 (1 - r_w)^{0,5136} & \text{pour } r_w > 0,9628 \end{cases} \quad (158)$$

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

$$r_w = \begin{cases} 1 - 0,9746 (1 - k_{ns}^2)^{2,170} & \text{pour } k_{ns}^2 \leq 0,26 \\ 1 - 0,6921 (1 - k_{ns}^2)^{1,034} & \text{pour } k_{ns}^2 > 0,26 \end{cases} \quad (159)$$

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

$$P_{dns} = \frac{P_{ns}}{I_{ns}} \quad (160)$$

où P_{ns} est la probabilité d'interruption, lorsqu'aucune protection n'est utilisée, donnée par la formule (29).

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

$$P_{ds} = \frac{P_s^2}{\eta (1 - k_s^2)} \quad (161)$$

où P_s est la probabilité d'interruption lorsqu'aucune protection n'est utilisée, donnée par la formule (117).

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

$$P_d = \left(P_{ds}^{0,75} + P_{dns}^{0,75} \right)^{4/3} \quad (162)$$

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

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

$$k_{ns,f}^2 = \exp \left[-\frac{0,07}{\eta} \left(\frac{\Delta f}{f} \right) \right] \quad (163)$$

où:

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

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

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

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

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

Étape 1: Évaluer l'angle d'arrivée moyen, μ_0 , à partir de la formule:

$$\mu_0 = 2,89 \times 10^{-5} G_m d \quad \text{degrés} \quad (164)$$

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_0 peut être évalué à partir de l'angle d'arrivée du rayon réfléchi dans les conditions de propagation normalisées.

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

$$r = \begin{cases} 0,113 \sin \left[150 (\delta / \Omega) + 30 \right] + 0,963 & \text{pour } q > 1 \\ q & \text{pour } q \leq 1 \end{cases} \quad (165)$$

où:

$$q = 2505 \times 0,0437^{(\delta / \Omega)} \times 0,593^{(\varepsilon / \delta)} \quad (166)$$

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.

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

$$Q_0 = r \left(0,9399 \mu_0 \times 10^{-24,58 \mu_0^2} \right) \left[2,469^{1,879(\delta/\Omega)} \times 3,615 [(\delta/\Omega)^{1,978(\varepsilon/\delta)}] \times 4,601 [(\delta/\Omega)^{2,152(\varepsilon/\delta)^2}] \right] \quad (167)$$

Étape 4: Calculer la probabilité d'existence d'évanouissements par trajets multiples, η , comme à l'Étape 2 du § 4.1.

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

$$P_{dns} = \eta Q_0 \times 10^{-F/6,6} \quad (168)$$

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

$$k_s^2 = 1 - \left(0,0763 \times 0,694^{\mu_0} \times 10^{23,3 \mu_0^2} \right) \delta \left(0,211 - 0,188 \mu_0 - 0,638 \mu_0^2 \right)^\Omega \quad (169)$$

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

$$P_{ds} = \frac{P_s^2}{\eta (1 - k_s^2)} \quad (170)$$

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

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

$$P_d = \left(P_{ds}^{0,75} + P_{dns}^{0,75} \right)^{4/3} \quad (171)$$

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

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

$$k_{ns} = k_{ns,s} k_{ns,f} \quad (172)$$

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 § 6.2.5.1) et dans le cas de la diversité de fréquence (voir le § 6.2.5.2).

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

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

Étape 1: Calculer η comme à l'Étape 2 du § 4.1.

Étape 2: Calculer le paramètre de diversité, $I_{ns,q}$, par:

$$I_{ns,q} = \min \left\{ I_{ns,s}, I_{ns,f}, \frac{I_{ns,s} + I_{ns,f}}{\min \{ I_{ns,s}, I_{ns,f} \} \times k_{ns,s}^2 \times k_{ns,f}^2} \right\} \quad (173)$$

où $k_{ns,s}$ et $k_{ns,f}$ sont obtenus comme au § 6.2.5.4.

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

$$P_{dns} = \frac{P_{ns}}{I_{ns,s} \times I_{ns,f} \times I_{ns,q}} \quad (174)$$

où P_{ns} est obtenu par la formule (29).

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

$$k_{ns}^2 = 1 - \sqrt{\eta} \left(1 - k_{ns,s}^2 \right) \left(1 - k_{ns,f}^2 \right) \quad (175)$$

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

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

$$P_{ds} = \left[\frac{P_s^2}{\eta (1 - k_s^2)} \right]^2 \quad (176)$$

où P_s est la probabilité d'interruption lorsqu'aucune protection n'est utilisée, donnée par la formule (117).

Étape 7: La probabilité totale d'interruption, P_d , s'obtient alors par la formule (162).

7 Prévision de la probabilité totale d'interruption

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

$$P_t = \begin{cases} P_{ns} + P_s + P_{XP} \\ P_d + \frac{P_{XP}}{I} \end{cases} \quad \text{en cas d'utilisation de techniques de diversité} \quad (177)$$

chacune des probabilités composantes étant obtenue selon les procédures données aux §§ 2.3.6; 4.1; 5.1; 6.2.4 et 6.2.5.

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 §§ 2.4.7 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.

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 effectuées dans des pays d'Europe de l'Est aux climats tempérés montrent que les effets de la propagation par trajets multiples ont le moins de chance de se produire en hiver et au cours des deux mois qui précèdent cette saison. Pour les essais qui doivent être effectués en été, la période de la journée pendant laquelle, selon les observations effectuées, ces effets ont le moins de chance de se produire, est la tranche horaire de 10 à 14 h, heure locale.

Des mesures effectuées dans un pays d'Europe occidentale ayant un climat côtier à 60° nord montrent que les effets de la propagation par trajets multiples ont le moins de chance de se produire dans la tranche horaire de 13 à 20 h, heure locale, quelle que soit la saison. La période de l'hiver est la période la moins affectée par les évanouissements dus à la propagation par trajets multiples; viennent ensuite l'automne et le printemps.

Pièce jointe à l'Annexe

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

Étape 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.

Étape 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.

Étape 3: Calculer l'inclinaison du trajet $|\varepsilon_p|$ et le dégagement moyen du terrain h_c à partir des formules (5) et (6).

Étape 4: Utiliser les coordonnées (p_1, A_1) du «premier point de la queue», ainsi que les valeurs de $d, f, |\varepsilon_p|, h_c$ dans la formule (7), pour obtenir le facteur géoclimatique K .

Étape 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 $\log K$. Les données des facteurs géoclimatiques dans le fichier LogK.csv correspondent de près aux données d'évanouissement du Tableau I-2 du DBSG3 à proximité des trajets du tableau, car ce fichier a été généré par krigeage universel, une technique qui combine régression et interpolation.