

RECOMMANDATION UIT-R P.452-11

**Méthode de prévision pour évaluer les brouillages hyperfréquences
entre stations situées à la surface de la Terre à des fréquences
supérieures à 0,7 GHz environ***

(Question UIT-R 208/3)

(1970-1974-1978-1982-1986-1992-1994-1995-1997-1999-2001-2003)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) qu'en raison de l'encombrement du spectre radioélectrique, les bandes de fréquences doivent être partagées entre différents services de Terre, entre systèmes du même service et entre systèmes des services de Terre et des services Terre-espace;
- b) que, pour permettre aux systèmes qui se partagent les mêmes bandes de fréquences de coexister de façon satisfaisante on a besoin de méthodes de prévision de la propagation des brouillages qui soient précises et fiables d'utilisation et acceptables par toutes les parties concernées;
- c) qu'il est nécessaire de disposer de prévisions de propagation des brouillages qui répondent aux objectifs de qualité de fonctionnement et de disponibilité pendant «le mois le plus défavorable»;
- d) qu'il faut que ces méthodes de prévision s'appliquent à tous les types de trajets dans toutes les régions du monde,

recommande

1 d'utiliser la méthode de prévision des brouillages hyperfréquences, présentée dans l'Annexe 1, pour évaluer l'affaiblissement de propagation à utiliser dans les calculs de brouillage entre stations à la surface de la Terre, aux fréquences supérieures à environ 0,7 GHz.

Annexe 1

1 Introduction

L'encombrement du spectre radioélectrique rend nécessaire le partage d'un grand nombre de bandes de fréquences entre différents services radioélectriques et entre les différents opérateurs de services radioélectriques similaires. Pour assurer une coexistence satisfaisante des systèmes de Terre et des systèmes Terre-espace concernés, il est important de pouvoir calculer avec une précision suffisante les niveaux de brouillage mutuel possible en utilisant des méthodes et des modèles de prévision acceptables par toutes les parties concernées, et dont la précision et la fiabilité ont été éprouvées.

* Deux logiciels (REC452 et SCAT) associés aux procédures de prévision décrites dans la présente Recommandation sont disponibles dans les pages du site web de l'UIT-R traitant de la Commission d'études 3 des radiocommunications.

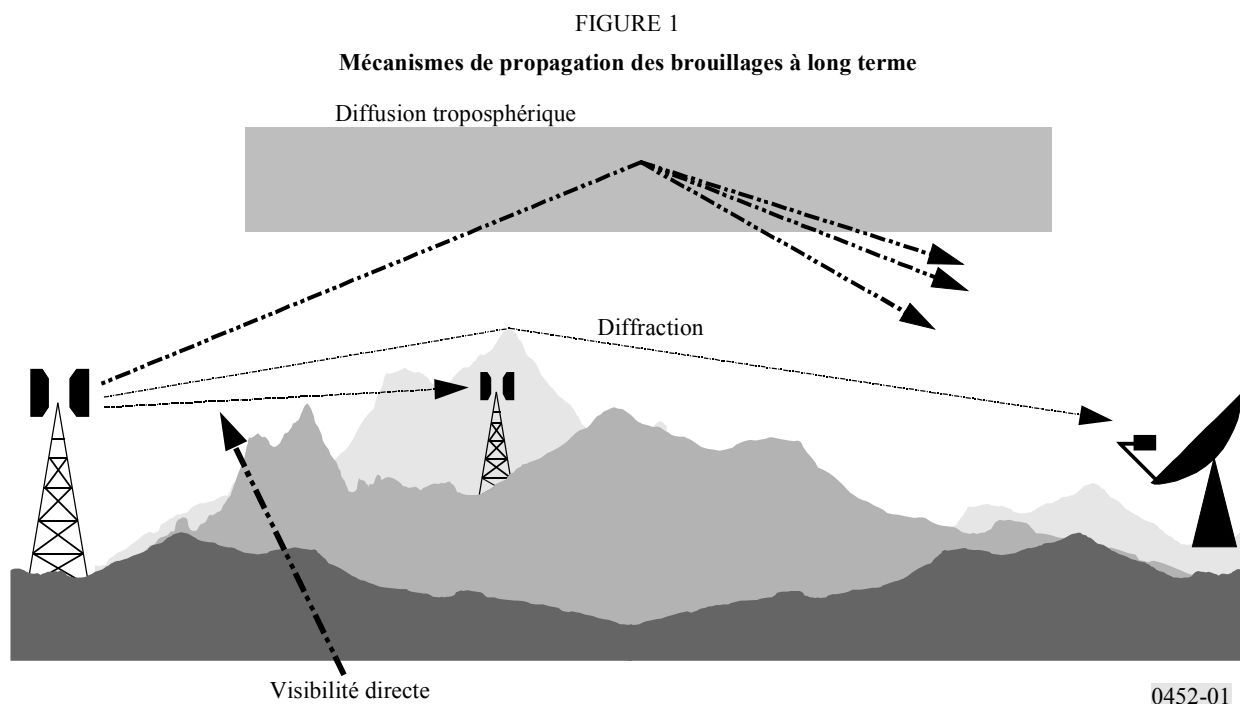
De nombreux types et combinaisons de trajets de brouillage peuvent exister, entre des stations situées à la surface de la Terre ou entre ces stations et des stations spatiales, et il est nécessaire de disposer de méthodes de prévision pour chaque scénario. La présente Annexe traite l'un des cas de brouillage les plus importants, à savoir les brouillages possibles entre des stations hyperfréquences situées à la surface de la Terre.

La procédure de prévision décrite ci-dessous convient pour les stations radioélectriques fonctionnant à des fréquences comprises entre 0,7 et 30 GHz environ. La méthode s'appuie sur une série complémentaire de modèles de propagation, ce qui assure que les prévisions couvrent tous les phénomènes importants de propagation de brouillage qui peuvent se présenter. Des méthodes d'analyse des caractéristiques radiométéorologiques et topographiques du trajet sont fournies, de telle sorte qu'il est possible de faire une prévision jusqu'à une distance limite de 10000 km pour toute situation de brouillage réelle à laquelle s'applique la procédure.

2 Mécanismes de propagation des brouillages

Le brouillage hyperfréquence fait intervenir un certain nombre de mécanismes de propagation dont l'importance individuelle dépend du climat, de la fréquence, du pourcentage du temps considéré, de la longueur et de la topographie du trajet. A un instant quelconque, on peut avoir affaire à un ou plusieurs mécanismes. Les principaux mécanismes de propagation des brouillages sont les suivants:

- *Visibilité directe* (Fig. 1): Le cas le plus simple de propagation des brouillages est celui où l'on a un trajet en visibilité directe dans des conditions atmosphériques normales (c'est-à-dire une atmosphère bien mélangée). Cependant, un problème peut se poser lorsque des obstacles situés sous le trajet provoquent une diffraction qui accroît légèrement le niveau du signal au-dessus de la valeur à laquelle on s'attend normalement. Par ailleurs, sauf sur les trajets les plus courts (c'est-à-dire pour les trajets de longueur supérieure à 5 km environ), les niveaux des signaux peuvent fréquemment subir des renforcements importants pendant de courtes périodes, en raison d'effets de propagation par trajets multiples et de focalisation dus à la stratification de l'atmosphère (voir la Fig. 2).
- *Diffraction* (Fig. 1): Au-delà de la visibilité directe et dans les conditions normales, il y a généralement prédominance des effets de diffraction chaque fois qu'on a affaire à des niveaux de signal élevés. Dans le cas des services où les problèmes d'anomalie à court terme ne sont pas importants, la densité de systèmes réalisable dépend le plus souvent de la précision avec laquelle on peut modéliser la diffraction. Les prévisions de diffraction doivent couvrir les situations suivantes: terre régulière, obstacle(s) isolé(s) ou terrain irrégulier (non structuré).
- *Diffusion troposphérique* (Fig. 1): Ce mécanisme définit le niveau de brouillage ambiant pour de longs trajets (par exemple, plus de 100-150 km), sur lesquels le champ de diffraction devient très faible. Cependant, sauf dans un petit nombre de cas particuliers mettant en jeu des stations terriennes à grande sensibilité ou des brouilleurs très puissants (par exemple, des systèmes radar), le brouillage par diffusion troposphérique se situe à un niveau trop bas pour avoir des effets significatifs.
- *Formation de conduits au sol* (Fig. 2): C'est le phénomène de brouillage à court terme le plus important observé au-dessus d'étendues d'eau ou dans des zones côtières à relief peu marqué. Ce phénomène peut donner des niveaux de signal élevés sur de grandes distances (plus de 500 km au-dessus de la mer). Dans certaines conditions, ces niveaux peuvent dépasser le niveau «espace libre» équivalent.

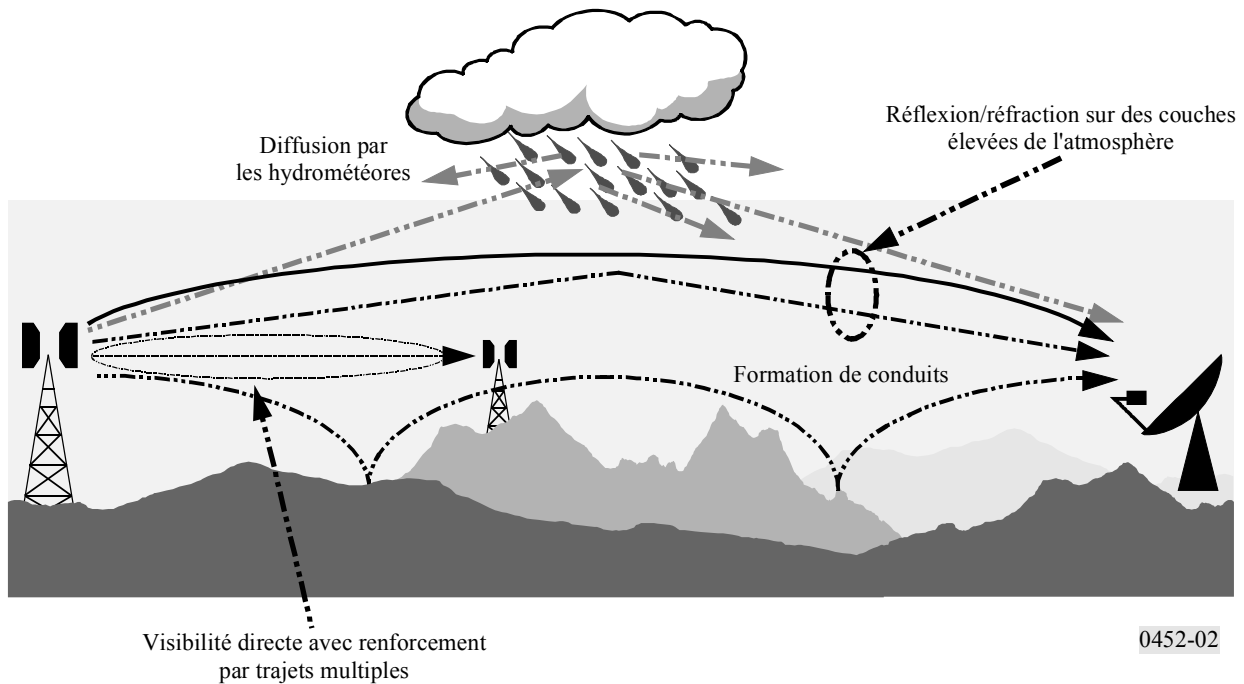


- *Réfraction et réflexion sur les couches hautes de l'atmosphère* (Fig. 2): Il est primordial de pouvoir traiter ce cas, car dans des situations où la géométrie du trajet y est favorable, la réfraction dans et/ou la réflexion sur des couches hautes (quelques centaines de mètres ou plus) permet aux signaux de surmonter efficacement l'affaiblissement par diffraction sur le terrain. Ici également, le phénomène peut avoir des incidences importantes sur les très grandes distances (jusqu'à 250-300 km).
- *Diffusion par les hydrométéores* (Fig. 2): La diffusion par les hydrométéores peut être une source de brouillage entre des émetteurs de liaisons de Terre et des stations terriennes; en effet, ce phénomène a une action pratiquement omnidirectionnelle, de sorte qu'il peut se faire sentir en dehors d'un trajet de brouillage situé dans le plan du grand cercle. Toutefois, ces signaux brouilleurs sont extrêmement faibles et ne présentent pas en général un problème important.

L'une des difficultés principales dans la prévision des brouillages, difficulté qui est commune à toutes les méthodes de prévision de la propagation dans la troposphère, est de fournir un ensemble unifié de méthodes pratiques, couvrant une large gamme de distances et de pourcentages du temps; dans l'atmosphère réelle, on peut passer progressivement de la prédominance statistique d'un mécanisme à un autre lorsque les conditions météorologiques et/ou celles relatives au trajet changent. Il se peut que, particulièrement dans les régions de transition, le signal présente un niveau déterminé pendant un pourcentage de temps total qui est la somme des pourcentages de temps dus aux différents mécanismes. Dans la méthode décrite ici, on a délibérément choisi de faire une prévision séparée des niveaux de brouillage selon les différents mécanismes de propagation, jusqu'à un stade final où ils peuvent être combinés pour obtenir une prévision globale pour le trajet. Cette prévision globale s'appuie sur une technique associant les différents mécanismes de propagation de telle sorte que, quels que soient la distance de trajet et le pourcentage de temps considérés, le renforcement du signal suivant le modèle équivalent fictif de propagation en visibilité directe est le plus élevée possible.

FIGURE 2

Mécanismes anormaux de propagation occasionnant des brouillages (à court terme)



3 Prédiction des brouillages par temps clair

3.1 Remarques générales

La méthode de prédiction fait appel à cinq modèles de propagation pour analyser les mécanismes de propagation par temps clair indiqués au § 2. Il s'agit des modèles suivants:

- *visibilité directe* (incluant des renforcements du signal dus aux effets des trajets multiples et de la focalisation);
- *diffraction* (ce modèle englobe les cas suivants: terre régulière, terrain irrégulier et sous-trajets);
- *diffusion troposphérique*;
- *propagation anormale* (formation de conduits et réflexion/réfraction dans les couches);
- *variation du gain de surélévation dans un groupe d'obstacles* (le cas échéant).

Suivant le type du trajet, déterminé par une analyse du profil de ce trajet, on applique un ou plusieurs de ces modèles pour faire la prédiction requise de l'affaiblissement de propagation.

3.2 Elaboration d'une prédiction

3.2.1 Exposé de la procédure

On trouvera ci-après l'exposé des diverses étapes à suivre pour effectuer une prédiction:

Etape 1: Données d'entrée

Les principales données d'entrée requises pour l'application de la méthode sont données dans le Tableau 1. Toutes les autres informations sont déduites de ces données de base pendant l'application de la procédure.

TABLEAU 1
Principales données d'entrée

Paramètre	Résolution préférée	Description
f	0,01	Fréquence (GHz)
p	0,001	Pourcentage(s) de temps requis pendant lequel l'affaiblissement de propagation calculé n'est pas dépassé
φ_t, φ_r	0,001	Latitude de la station (degrés)
ψ_t, ψ_r	0,001	Longitude de la station (degrés)
h_{tg}, h_{rg}	1	Hauteur du centre de l'antenne au-dessus du sol (m)
h_{ts}, h_{rs}	1	Hauteur du centre de l'antenne au-dessus du niveau moyen de la mer (m)
G_t, G_r	0,1	Gain d'antenne dans la direction de l'horizon pour un trajet de brouillage le long du grand cercle (dBi)

NOTE 1 – Pour les stations brouilleuse et brouillée:

t : brouilleuse

r : brouillée.

Etape 2: Choix entre prévision pour une année moyenne ou pour le mois le plus défavorable

Le choix entre une prévision pour l'année ou pour le «mois le plus défavorable» est généralement dicté par les objectifs de qualité (qualité de fonctionnement, disponibilité) du système radio-électrique brouillé à l'extrémité réceptrice du trajet de brouillage. Etant donné que le brouillage est souvent bidirectionnel, il peut être nécessaire d'évaluer deux séries d'objectifs de qualité pour déterminer le cas le plus défavorable sur lequel l'affaiblissement de propagation acceptable minimum a besoin d'être fondé. Dans la plupart des cas, les objectifs de qualité seront exprimés en pourcentage pour «un mois quelconque», et il convient alors d'utiliser les données pour le mois le plus défavorable.

Les modèles de prévision de la propagation permettent de prévoir la distribution annuelle de l'affaiblissement de propagation. Dans les prévisions pour une année moyenne, on utilise directement dans la procédure de prévision les pourcentages de temps, p , pendant lesquels certaines valeurs de cet affaiblissement ne sont pas dépassées. Si on a besoin de prévisions pour le mois le plus défavorable moyen, il faut calculer le pourcentage de temps équivalent annuel, p , du pourcentage de temps du mois le plus défavorable, p_w , pour la latitude du point milieu du trajet, φ , en appliquant la formule:

$$p = 10^{\left(\frac{\log(p_w) + \log(G_L) - 0,186 \omega - 0,444}{0,816 + 0,078 \omega} \right)} \% \quad (1)$$

où:

ω : fraction du trajet située au-dessus des étendues d'eau (voir le Tableau 3).

$$G_L = \begin{cases} \sqrt{1,1 + |\cos 2 \varphi|^{0,7}} & \text{pour } |\varphi| \leq 45^\circ \\ \sqrt{1,1 - |\cos 2 \varphi|^{0,7}} & \text{pour } |\varphi| > 45^\circ \end{cases} \quad (1a)$$

Si nécessaire, il faut limiter la valeur de p de sorte que $12 p \geq p_w$.

A noter que la latitude φ (degrés) est supposée positive dans l'hémisphère Nord.

Cela étant, le calcul donne l'affaiblissement de propagation pendant le pourcentage de temps recherché du mois le plus défavorable, p_w %.

Etape 3: Données radiométéorologiques

La procédure de prévision utilise trois paramètres radiométéorologiques pour décrire la variabilité des conditions de propagation normales et anormales aux différents endroits du globe.

- ΔN (unités N/km), gradient moyen de l'indice de réfraction radioélectrique dans le premier kilomètre de l'atmosphère, permet de déterminer le rayon équivalent de la Terre à utiliser pour l'analyse du profil de trajet et de la diffraction par les obstacles. Les Fig. 4 et 5 donnent des cartes mondiales, respectivement de la moyenne annuelle de ΔN et de la valeur maximale de la moyenne mensuelle pour les prévisions relatives au mois le plus défavorable. On notera que ΔN est une grandeur positive dans cette procédure.
- Le paramètre β_0 (%), pourcentage du temps pendant lequel on peut s'attendre, dans les 100 premiers mètres de la basse atmosphère, à un gradient de décroissance de l'indice de réfraction supérieur à 100 unités N/km, est utilisé pour estimer l'incidence relative de la propagation totalement anormale à la latitude considérée. La valeur à utiliser pour β_0 est la valeur qui correspond à la latitude du point milieu du trajet.
- Le paramètre N_0 (unités N), coïncide au niveau de la mer, est utilisé exclusivement dans le modèle de la diffusion troposphérique comme mesure de la variation de ce mécanisme de diffusion en fonction de l'emplacement. La Fig. 6 donne les valeurs annuelles de N_0 . Le calcul relatif au trajet de diffusion est fondé sur une géométrie de trajet déterminée par les valeurs annuelles de ΔN ou par les valeurs de ce paramètre correspondant au mois le plus défavorable; pour cette raison, il est inutile de considérer aussi les valeurs de N_0 pour le mois le plus défavorable. Les valeurs correctes de ΔN et N_0 sont celles qui correspondent au point milieu du trajet et qui sont données par les cartes appropriées.

L'incidence ponctuelle de la propagation anormale, β_0 (%), au point milieu du trajet a pour expression:

$$\beta_0 = \begin{cases} 10^{-0,015|\varphi| + 1,67} \mu_1 \mu_4 & \% & \text{pour } |\varphi| \leq 70^\circ \\ 4,17\mu_1 \mu_4 & \% & \text{pour } |\varphi| > 70^\circ \end{cases} \quad (2)$$

où:

φ : latitude du point milieu du trajet (degrés).

Le paramètre μ_1 dépend des proportions des tronçons du trajet situés respectivement au-dessus des terres (intérieur des terres et/ou zones côtières) et au-dessus des étendues d'eau. Ce paramètre a pour expression:

$$\mu_1 = \left[10^{\frac{-d_{tm}}{16 - 6,6\tau}} + \left[10^{-(0,496 + 0,354\tau)} \right]^5 \right]^{0,2} \quad (3)$$

où la valeur de μ_1 doit être ≤ 1 ,

avec:

$$\tau = \left[1 - e^{-\left(4,12 \times 10^{-4} \times d_{lm}^{2,41}\right)} \right] \quad (3a)$$

où:

d_{lm} : longueur du plus long tronçon terrestre continu (intérieur des terres + zones côtières) du trajet dans le plan du grand cercle (km)

d_{lm} : longueur du plus long tronçon terrestre continu (intérieur des terres) du trajet dans le plan du grand cercle (km).

Les zones radioclimatiques à prendre en considération pour déterminer d_{lm} et d_{lm} sont définies dans le Tableau 2.

$$\mu_4 = \begin{cases} 10^{(-0,935 + 0,0176|\varphi|) \log \mu_1} & \text{pour } |\varphi| \leq 70^\circ \\ 10^{0,3 \log \mu_1} & \text{pour } |\varphi| > 70^\circ \end{cases} \quad (4)$$

TABLEAU 2

Zones radioclimatiques

Type de zone	Code	Définition
Zone côtière	A1	Zones côtières et littorales, c'est-à-dire terres adjacentes à la mer jusqu'à une altitude de 100 m par rapport au niveau moyen de la mer ou des eaux, mais limitée à une distance de 50 km à partir de l'étendue maritime la plus proche. S'il n'est pas possible d'obtenir la valeur exacte 100 m, on pourra utiliser une valeur approchée, par exemple 300 pieds
Zone de terre	A2	Toutes les terres, autres que les «zones côtières» et littorales visées dans la Zone A1 ci-dessus
Mer	B	Mers, océans et vastes étendues d'eau (c'est-à-dire couvrant un cercle d'au moins 100 km de diamètre)

Vastes étendues d'eaux intérieures

Une «vaste» étendue d'eaux intérieures, à considérer comme faisant partie de la Zone B, est définie comme suit: zone d'aire au moins égale à 7800 km², en excluant l'aire des cours d'eau. Les îles situées dans ces étendues d'eau sont assimilées à de l'eau dans le calcul de l'aire si elles ont des altitudes inférieures à 100 m au-dessus du niveau moyen des eaux sur plus de 90% de leur surface. Les îles qui ne remplissent pas cette condition seront considérées comme des étendues terrestres dans le calcul de l'aire des étendues d'eau.

Vastes zones contenant des lacs intérieurs ou des terres humides

Considérons le cas de vastes zones de terres (plus de 7800 km²) contenant un grand nombre de petits lacs ou un réseau de cours d'eau. Les administrations assimileront ces zones à la Zone «côtière» A1 si plus de la moitié de leur superficie est occupée par des étendues d'eau, et si plus de 90% des terres ont une altitude inférieure à 100 m au-dessus du niveau moyen des eaux.

Il est difficile de déterminer sans ambiguïté les régions climatiques relevant de la Zone A1, les vastes étendues d'eaux à l'intérieur des terres et les vastes zones de terres contenant des lacs intérieurs et des terres humides. En conséquence, il est demandé aux administrations de notifier au Bureau des Radiocommunications (BR) de l'UIT les régions situées à l'intérieur de leurs frontières nationales qu'elles souhaitent voir reconnaître comme appartenant à l'une de ces catégories. Faute d'informations contraires dûment notifiées et enregistrées, toutes les zones terrestres seront considérées comme faisant partie de la Zone climatique A2.

Pour assurer le maximum de cohérence entre les résultats obtenus par les diverses administrations, il est fortement recommandé que les calculs de cette procédure soient effectués sur la base de la Carte mondiale numérisée de l'UIT-R (IDWM). Cette carte, qui est disponible auprès du BR de l'UIT, est adaptée à deux environnements informatiques: ordinateurs centraux et ordinateurs personnels.

Rayon terrestre équivalent

La valeur médiane, k_{50} , du facteur multiplicatif du rayon terrestre a pour expression:

$$k_{50} = \frac{157}{157 - \Delta N} \quad (5)$$

Si l'on prend 6371 km comme rayon terrestre vrai, on a pour la valeur médiane du rayon terrestre équivalent, a_e :

$$a_e = 6371 \cdot k_{50} \quad \text{km} \quad (6)$$

Etape 4: Analyse du profil du trajet

Les valeurs de certains paramètres relatifs au trajet qui sont nécessaires pour les calculs (voir le Tableau 3) doivent être obtenues à l'aide d'une analyse initiale du profil du trajet, sur la base de la valeur de a_e donnée par l'équation (6). Les informations sur la manière d'obtenir, de construire et d'analyser le profil du trajet sont données dans l'Appendice 2. Ayant ainsi analysé le profil, on peut aussi classer le trajet dans l'une des trois catégories géométriques indiquées dans le Tableau 4.

NOTE 1 – On trouvera dans la Recommandation UIT-R P.526 la description de la méthode à employer pour déterminer les valeurs d'autres paramètres relatifs au profil, nécessaires spécifiquement pour calculer la diffraction.

Etape 5: Calcul des prévisions de propagation

Le Tableau 4 indique les modèles de propagation adaptés à chaque type de trajet. Les formules propres aux prévisions des différents mécanismes de propagation sont indiquées dans les paragraphes mentionnés dans le Tableau. Pour faire une prévision globale, il faut calculer les prévisions des différents mécanismes de propagation et les associer comme indiqué au § 4.7. Dans le cas de trajets transhorizons, on utilise conjointement des éléments du modèle en visibilité directe et des éléments du modèle de diffraction. La prévision est terminée lorsque cette opération a été effectuée pour tous les pourcentages de temps considérés. Il convient de noter que l'équation (8c) utilisée est une formule mathématique complexe visant à éviter les variations abruptes de pente et n'est pas une simple addition linéaire de puissances électriques.

TABLEAU 3

Valeurs des paramètres obtenues à l'issue de l'analyse du profil du trajet

Type de trajet	Paramètre	Description
Transhorizon	d	Longueur du trajet le long du grand cercle (km)
Transhorizon	d_{lt}, d_{lr}	Distance entre les antennes d'émission et de réception et leur horizon respectif (km)
Transhorizon	θ_t, θ_r	Angles d'élévation de l'horizon à l'émission et à la réception (mrad)
Transhorizon	θ	Distance angulaire du trajet (mrad)
Tous	h_{ts}, h_{rs}	Hauteur du centre des antennes au-dessus du niveau moyen de la mer (m)
Transhorizon	h_{te}, h_{re}	Hauteurs équivalentes des antennes au-dessus du terrain (m) (voir les définitions dans l'Appendice 2)
Tous	$d_b^{(1)}$	Longueur cumulée des tronçons du trajet au-dessus d'étendues d'eau (km)
Tous	$\omega^{(1)}$	Fraction de la longueur totale du trajet au-dessus d'étendues d'eau: $\omega = d_b/d \quad (7)$ où d est la distance le long du grand cercle (km) calculée à l'aide de l'équation (42). Pour les trajets en totalité terrestres: $\omega = 0$
Transhorizon	$d_{ct}^{(1)}$	Distance entre la première station terminale (source du brouillage) et la côte, le long du trajet de brouillage dans le plan du grand cercle (km)
Transhorizon	$d_{cr}^{(1)}$	Distance correspondante pour la deuxième station (station brouillée) (km)

⁽¹⁾ Ces paramètres doivent être pris en compte uniquement pour les trajets qui comportent un ou plusieurs tronçons passant au-dessus d'étendues d'eau.

Les valeurs exactes de d_{ct} et d_{cr} présentent de l'importance seulement lorsque d_{ct} et $d_{cr} \leq 5$ km. Si, pour l'un ou l'autre de ces paramètres ou pour les deux, les distances sont manifestement supérieures à 5 km, il suffit de tenir compte de la condition > 5 km. En fait, peu nombreux sont les trajets de brouillage qui nécessiteront une évaluation détaillée de ces deux paramètres.

TABLEAU 4

Classification du trajet de brouillage et modèle de propagation à utiliser

Classification	Modèle à utiliser
Visibilité directe, avec première zone de Fresnel dégagée	En visibilité directe (§ 4.2) Affaiblissement par des groupes d'obstacles (§ 4.5, le cas échéant)
Visibilité directe avec diffraction par des obstacles situés sous le trajet (incursion du terrain dans la 1 ^{ère} zone de Fresnel)	En visibilité directe (§ 4.2) Diffraction (§ 4.3) Affaiblissement par des groupes d'obstacles (§ 4.3, le cas échéant)
Transhorizon	Diffraction (§ 4.3 pour $d \leq 200$ km) Phénomènes de conduit/réflexion sur des couches (§ 4.5) Diffusion troposphérique (§ 4.4) Affaiblissement par des groupes d'obstacles (§ 4.6, le cas échéant)

TABLEAU 5
Méthode de calcul de prévisions globales

Type de trajet	Mesure à prendre
Visibilité directe	<p>La prévision est obtenue en additionnant les affaiblissements fournis par le modèle en visibilité directe et le modèle des affaiblissements dus à des groupes d'obstacles, c'est-à-dire:</p> $L_b(p) = L_{b0}(p) + A_{ht} + A_{hr} \quad \text{dB} \quad (8a)$ <p>où:</p> <p>$L_{b0}(p)$: affaiblissement de propagation prévu (modèle en visibilité directe) non dépassé pour $p\%$ du temps</p> <p>A_{ht}, A_{hr}: affaiblissements supplémentaires appropriés dus aux effets de gain de surélévation dans un groupe d'obstacles local</p>
Visibilité directe avec diffraction par des obstacles situés sous le trajet	<p>On obtient la prévision en additionnant les affaiblissements fournis par le modèle en visibilité directe, le modèle avec diffraction par des obstacles sous le trajet et le modèle relatif aux groupes d'obstacles, c'est-à-dire:</p> $L_b(p) = L_{b0}(p) + L_{ds}(p) + A_{ht} + A_{hr} \quad \text{dB} \quad (8b)$ <p>où:</p> <p>$L_{ds}(p)$: prévision pour $p\%$ du temps, donnée par la composante affaiblissement par diffraction <i>sous le trajet</i> du modèle de diffraction</p>
Transhorizon	<p>La prévision globale se fait en deux étapes:</p> <p>$L'_{ba}(p)$, affaiblissement fourni par le modèle modifié de propagation par conduits/de réflexion sur des couches, est obtenu par application de l'algorithme du § 4.7.1. On détermine ensuite la prévision globale grâce à la formule suivante:</p> $L_b(p) = -5 \log (10^{-0,2L_{bs}} + 10^{-0,2L_{bd}} + 10^{-0,2L_{ba}}) + A_{ht} + A_{hr} \quad \text{dB} \quad (8c)$ <p>où $L_{bs}(p)$ et $L_{bd}(p)$ sont les affaiblissements de propagation pour le pourcentage de temps $p\%$, prévus respectivement par les modèles de diffusion troposphérique et de diffraction.</p> <p>NOTE 1 – Lorsqu'un modèle n'a pas été invoqué pour un trajet (parce que les conditions données dans le Tableau 4 n'étaient pas réunies), le terme correspondant dans l'équation (8c) doit être omis.</p>

4 Modèles de propagation par temps clair

4.1 Généralités

La procédure décrite ci-dessus fait appel à un ou plusieurs modèles de propagation différents pour calculer les composantes de la prévision globale. Ces modèles de propagation sont décrits ci-dessous.

4.2 Propagation en visibilité (comprenant les effets à court terme)

L'affaiblissement de transmission de référence $L_{b0}(p)$ non dépassé pour un pourcentage du temps $p\%$ imputable à la propagation en visibilité directe est donné par:

$$L_{b0}(p) = 92,5 + 20 \log f + 20 \log d + E_s(p) + A_g \quad \text{dB} \quad (9)$$

où:

$E_s(p)$: correction pour tenir compte des effets des trajets multiples et de la focalisation:

$$E_s(p) = 2,6 (1 - e^{-d/10}) \log (p / 50) \quad \text{dB} \quad (10)$$

A_g : absorption totale par les gaz (dB):

$$A_g = [\gamma_o + \gamma_w(\rho)]d \quad \text{dB} \quad (11)$$

où:

$\gamma_o, \gamma_w(\rho)$: affaiblissements linéiques dus respectivement à l'air sec et à la vapeur d'eau (voir la Recommandation UIT-R P.676)

ρ : concentration en vapeur d'eau:

$$\rho = 7,5 + 2,5 \omega \quad \text{g/m}^3 \quad (11a)$$

ω : fraction du trajet au-dessus de l'eau.

4.3 Diffraction

On admet l'hypothèse suivante en ce qui concerne la diffraction: la variabilité temporelle de l'affaiblissement supplémentaire dû à la diffraction résulte des variations de la vitesse de décroissance du coïndice radioélectrique global de l'atmosphère, à savoir que le facteur multiplicatif du rayon terrestre, $k(p)$, augmente lorsque le pourcentage de temps p diminue. On considère que cette hypothèse est valable pour $\beta_0 \leq p \leq 50\%$. Pour les pourcentages de temps inférieurs à β_0 , les niveaux des signaux sont plus liés aux mécanismes de propagation anormale qu'aux caractéristiques globales du coïndice de l'atmosphère. Pour les valeurs de p inférieures à β_0 , $k(p)$ est donc égal à $k(\beta_0)$.

La valeur du rayon terrestre équivalent qu'il convient d'utiliser dans les calculs de diffraction est donnée par:

$$a(p) = 6371 \cdot k(p) \quad \text{km} \quad (12)$$

où:

p : peut prendre les valeurs 50 ou β_0

$k(50\%)$: est donné par la formule (5)

$$k(\beta_0) = 3.$$

L'affaiblissement supplémentaire dû à la diffraction $L_d(p)$ est calculé par la méthode décrite au § 4.5 de la Recommandation UIT-R P.526, avec utilisation d'une distribution log-normale de l'affaiblissement entre 50% et β_0 :

- pour $p = 50\%$, $L_d(50\%)$ est calculé par la méthode décrite dans la Recommandation UIT-R P.526 pour la valeur médiane du rayon terrestre équivalent $a(50\%)$;
- pour $p \leq \beta_0$, $L_d(\beta_0)$ est calculé par la méthode décrite dans la Recommandation UIT-R P.526 pour le rayon terrestre équivalent $a(\beta_0)$ en utilisant les arêtes en lame de couteau identifiées pour le cas 50% (cas médian);
- pour $\beta_0 < p < 50\%$, $L_d(p)$ est donné par:

$$L_d(p) = L_d(50\%) - F_i(p) [L_d(50\%) - L_d(\beta_0)] \quad (13)$$

où:

F_i : fonction d'interpolation fondée sur une distribution log-normale de l'affaiblissement dû à la diffraction dans la plage $\beta_0\% < p < 50\%$; elle est donnée par:

$$F_i = I(p/100) / I(\beta_0/100) \quad (13a)$$

où $I(x)$ est la fonction de distribution normale cumulative inverse. L'Appendice 4 donne une approximation convenable de $I(x)$, qu'on peut utiliser en toute confiance pour $x < 0,5$.

NOTE 1 – On peut se servir du § 4.5 de la Recommandation UIT-R P.526 pour calculer l'affaiblissement par diffraction sur un trajet en visibilité directe avec obstacles situés sous le trajet, ou sur un trajet transhorizon.

L'affaiblissement de transmission de référence non dépassé pendant $p\%$ du temps pour un trajet avec diffraction est alors donné par la formule suivante:

$$L_{bd}(p) = 92,5 + 20 \log f + 20 \log d + L_d(p) + E_{sd}(p) + A_g \quad \text{dB} \quad (14)$$

où:

$E_{sd}(p)$: correction pour tenir compte des effets des trajets multiples entre les antennes et les obstacles à l'horizon

$$E_{sd}(p) = 2,6 \left(1 - e^{-(d_{lt} + d_{lr})/10} \right) \log \left(\frac{p}{50} \right) \quad \text{dB} \quad (14a)$$

A_g : absorption par les gaz, déterminée à l'aide des équations (11) et (11a).

4.4 Diffusion troposphérique (Notes 1 et 2)

NOTE 1 – Aux pourcentages de temps très inférieurs à 50%, il est difficile de séparer le mode vrai de diffusion troposphérique des autres phénomènes de propagation secondaires qui produisent des effets de propagation similaires. Le modèle de «diffusion troposphérique» adopté dans la présente Recommandation représente par conséquent une généralisation empirique du concept de diffusion troposphérique, qui englobe également ces effets de propagation secondaires. On a ainsi la possibilité de faire une prévision cohérente continue de l'affaiblissement de transmission de référence dans un intervalle de pourcentages de temps p allant de 0,001% à 50%; cela permet d'établir un lien entre, d'une part, le modèle «formation de conduits et réflexion sur des couches» applicable aux petits pourcentages de temps et, d'autre part, le «mode diffusion» vrai applicable au faible champ résiduel qui est dépassé pendant les plus grands pourcentages de temps.

NOTE 2 – Le modèle de prévision de la diffusion troposphérique a été élaboré pour les besoins de la prévision des brouillages. Il ne convient pas pour le calcul des conditions de propagation qui existent pendant plus de 50% du temps et qui influencent la qualité de fonctionnement des faisceaux hertziens transhorizon.

L'affaiblissement de transmission de référence dû à la diffusion troposphérique, $L_{bs}(p)$ (dB), non dépassé pendant un pourcentage de temps p quelconque mais inférieur à 50%, est donné par:

$$L_{bs}(p) = 190 + L_f + 20 \log d + 0,573 \theta - 0,15 N_0 + L_c + A_g - 10,1 [-\log(p/50)]^{0,7} \quad \text{dB} \quad (15)$$

où:

L_f : affaiblissement en fonction de la fréquence:

$$L_f = 25 \log f - 2,5 [\log(f/2)]^2 \quad \text{dB} \quad (15a)$$

L_c : affaiblissement par couplage entre l'ouverture et le milieu ambiant (dB):

$$L_c = 0,051 \cdot e^{0,055(G_t + G_r)} \quad \text{dB} \quad (15b)$$

N_0 : réfractivité au sol ramené au niveau de la mer, à mi-trajet (voir la Fig. 6)

A_g : absorption par les gaz, calculée à l'aide de l'équation (11), en adoptant $\rho = 3 \text{ g/m}^3$ pour toute la longueur du trajet.

4.5 Phénomène de conduit/réflexion sur les couches

On utilise la fonction suivante pour prévoir l'affaiblissement de transmission de référence, $L_{ba}(p)$ (dB), qui survient pendant des périodes de propagation anormale (phénomène de conduit et réflexion sur les couches):

$$L_{ba}(p) = A_f + A_d(p) + A_g \quad \text{dB} \quad (16)$$

où:

A_f : valeur totale des affaiblissements fixes par couplage (à l'exception des pertes dues aux groupes d'obstacles locaux) entre les antennes et la structure de la propagation anormale dans l'atmosphère:

$$A_f = 102,45 + 20 \log f + 20 \log (d_{lt} + d_{lr}) + A_{st} + A_{sr} + A_{ct} + A_{cr} \quad \text{dB} \quad (17)$$

A_{st}, A_{sr} : affaiblissements par diffraction dus à l'effet d'écran du terrain, respectivement pour la station brouilleuse et pour la station brouillée:

$$A_{st, sr} = \begin{cases} 20 \log \left[1 + 0,361 \theta''_{t,r} (f \cdot d_{lt,lr})^{1/2} \right] + 0,264 \theta''_{t,r} f^{1/3} & \text{dB} \quad \text{pour } \theta''_{t,r} > 0 \text{ mrad} \\ 0 & \text{dB} \quad \text{pour } \theta''_{t,r} \leq 0 \text{ mrad} \end{cases} \quad (18)$$

où:

$$\theta''_{t,r} = \theta_{t,r} - 0,1 d_{lt,lr} \quad \text{mrad} \quad (18a)$$

A_{ct}, A_{cr} : corrections pour tenir compte du couplage des conduits en surface au-dessus des étendues d'eau, respectivement pour la station brouilleuse et pour la station brouillée:

$$A_{ct, cr} = -3 e^{-0,25 d_{ct, cr}^2} \left[1 + \text{tgh} (0,07 (50 - h_{ts, rs})) \right] \quad \text{dB} \quad \text{pour } \omega \geq 0,75$$

$$d_{ct, cr} \leq d_{lt, lr} \quad (19)$$

$$d_{ct, cr} \leq 5 \text{ km}$$

$$A_{ct, cr} = 0 \quad \text{dB} \quad \text{dans tous les autres cas} \quad (19a)$$

Il convient de noter le domaine limité de conditions pour lequel l'équation (19) est nécessaire.

$A_d(p)$: affaiblissements en fonction du pourcentage de temps et de la distance angulaire, à l'intérieur du phénomène de propagation anormale:

$$A_d(p) = \gamma_d \cdot \theta' + A(p) \quad \text{dB} \quad (20)$$

où:

γ_d : affaiblissement linéique:

$$\gamma_d = 5 \times 10^{-5} a_e f^{1/3} \quad \text{dB/mrad} \quad (21)$$

θ' : distance angulaire (corrigée, le cas échéant à l'aide de l'équation (22a)), pour permettre l'application du modèle d'effet d'écran du terrain de l'équation (18):

$$\theta' = \frac{10^3 d}{a_e} + \theta'_t + \theta'_r \quad \text{mrad} \quad (22)$$

$$\theta'_{t,r} = \begin{cases} \theta_{t,r} & \text{mrad} & \text{pour } \theta_{t,r} \leq 0,1 d_{lt,lr} & \text{mrad} \\ 0,1 d_{lt,lr} & \text{mrad} & \text{pour } \theta_{t,r} > 0,1 d_{lt,lr} & \text{mrad} \end{cases} \quad (22a)$$

$A(p)$: variabilité en pourcentage de temps (distribution cumulative):

$$A(p) = -12 + (1,2 + 3,7 \times 10^{-3} d) \log \left(\frac{p}{\beta} \right) + 12 \left(\frac{p}{\beta} \right)^\Gamma \quad \text{dB} \quad (23)$$

$$\Gamma = \frac{1,076}{(2,0058 - \log \beta)^{1,012}} \times e^{-\left(9,51 - 4,8 \log \beta + 0,198 (\log \beta)^2\right) \times 10^{-6} \cdot d^{1,13}} \quad (23a)$$

$$\beta = \beta_0 \cdot \mu_2 \cdot \mu_3 \quad \% \quad (24)$$

μ_2 : terme correctif pour tenir compte de la géométrie du trajet:

$$\mu_2 = \left[\frac{500}{a_e} \frac{d^2}{\left(\sqrt{h_{te}} + \sqrt{h_{re}}\right)^2} \right]^\alpha \quad (25)$$

La valeur de μ_2 ne doit jamais être supérieure à 1.

$$\alpha = -0,6 - \varepsilon \cdot 10^{-9} \cdot d^{3,1} \cdot \tau \quad (25a)$$

où:

$$\varepsilon = 3,5$$

τ : défini dans l'équation (3a)

et α doit toujours être égal ou supérieur à $-3,4$

μ_3 : terme correctif pour tenir compte de l'irrégularité du terrain:

$$\mu_3 = \begin{cases} 1 & \text{pour } h_m \leq 10 \text{ m} \\ \exp \left[-4,6 \times 10^{-5} (h_m - 10) (43 + 6 d_i) \right] & \text{pour } h_m > 10 \text{ m} \end{cases} \quad (26)$$

$$d_i = \min (d - d_{lt} - d_{lr}, 40) \quad \text{km} \quad (26a)$$

A_g : absorption totale par les gaz, déterminée à l'aide des équations (11) et (11a).

Les autres termes ont été définis dans les Tableaux 1 et 2 et dans l'Appendice 2.

4.6 Affaiblissements supplémentaires dus à des groupes d'obstacles (clutter)

4.6.1 Considérations générales

Il y a beaucoup à gagner, en termes de protection contre le brouillage, à tirer parti des affaiblissements supplémentaires par diffraction dont peuvent bénéficier les antennes englobées dans des groupes d'obstacles (clutter) locaux liés au sol (bâtiments, végétation, etc.). La méthode décrite plus loin permet l'addition de ces affaiblissements dus aux groupes d'obstacles à chaque extrémité du trajet, ou aux deux extrémités, dans des situations où le scénario d'encombrement par les obstacles est connu. Si on a des doutes sur la nature exacte de cet environnement, on ne prendra pas en compte cet affaiblissement supplémentaire.

Les affaiblissements par les groupes d'obstacles sont appelés A_{ht} (dB) et A_{hr} (dB), respectivement pour la station brouilleuse et pour la station brouillée. La protection supplémentaire disponible dépend de la hauteur, raison pour laquelle cette protection est modélisée par une fonction de gain de surélévation qui est normalisée par rapport à la hauteur nominale du groupe d'obstacles. On connaît des hauteurs nominales pour toute une série de groupes d'obstacles de divers types.

La correction peut être appliquée à toutes les prévisions faites par temps clair selon les prescriptions de la présente Recommandation, c'est-à-dire pour tous les modes de propagation et tous les pourcentages de temps.

4.6.2 Catégories de groupes d'obstacles

Le Tableau 6 indique les catégories de groupes d'obstacles (ou de couverture de terrain) telles que définies dans la Recommandation UIT-R P.1058 auxquelles on peut appliquer la correction de gain de surélévation. La hauteur nominale du groupe d'obstacles, h_a (m), et la distance par rapport à l'antenne, d_k (km), sont considérées comme des valeurs «moyennes» les plus représentatives pour le type de groupes d'obstacles correspondant. Cependant, on a affecté le modèle de correction d'un certain degré de sécurité, du fait des incertitudes quant à la hauteur exacte à prendre en considération dans telle ou telle situation. Dans les cas où les paramètres du groupe d'obstacles sont connus avec plus de précision, on pourra les substituer directement aux valeurs données dans le Tableau 6.

Les hauteurs et distances nominales données au Tableau 6 sont proches de la hauteur caractéristique H_c et de la largeur de discontinuité caractéristique G_c définies dans la Recommandation UIT-R P.1058. Toutefois, le modèle utilisé ici pour évaluer les affaiblissements supplémentaires dus à l'occultation par des groupes d'obstacles (par la couverture du terrain) est affecté d'un certain degré de sécurité.

4.6.3 Le modèle de gain de surélévation

L'affaiblissement supplémentaire dû à la protection contre les effets des groupes d'obstacles locaux a pour expression:

$$A_h = 10,25 \times e^{-d_k} \left(1 - \operatorname{tgh} \left[6 \left(\frac{h}{h_a} - 0,625 \right) \right] \right) - 0,33 \quad (27)$$

où:

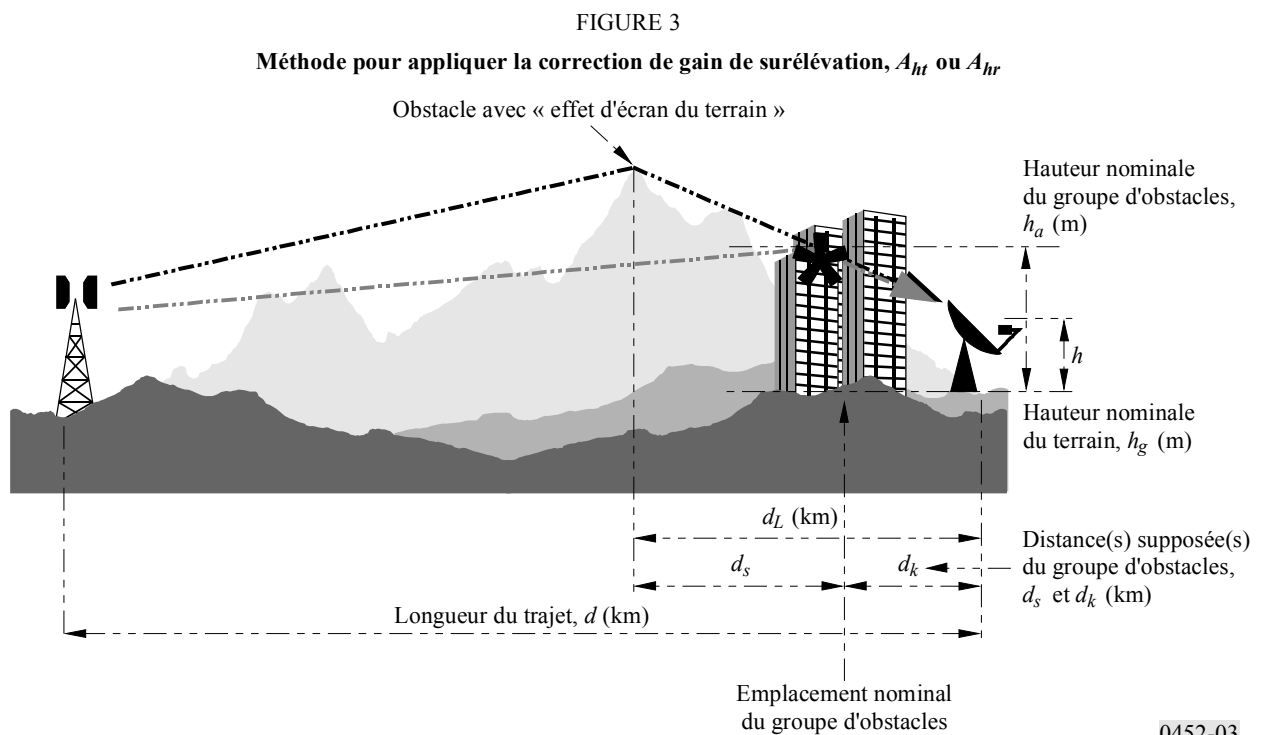
- d_k : distance (km) entre l'emplacement nominal du groupe d'obstacles et l'antenne (voir la Fig. 3)
- h : hauteur de l'antenne (m) au-dessus du niveau du terrain local
- h_a : hauteur nominale du groupe d'obstacles (m) au-dessus du niveau du terrain local.

TABLEAU 6

Hauteur et distance des groupes d'obstacles (valeurs nominales)

Catégorie de groupes d'obstacles (ou de couverture de terrain)	Hauteur nominale, h_a (m)	Distance nominale, d_k (km)
Cultures hautes Parcs Couverture peu dense, irrégulière Vergers (espacement régulier) Habitat dispersé	4	0,1
Centre de village	5	0,07
Arbres à feuilles caduques (espacement irrégulier) Arbres à feuilles caduques (espacement régulier) Forêt plantée de diverses essences	15	0,05
Conifères (espacement irrégulier) Conifères (espacement régulier)	20	0,05
Forêt tropicale	20	0,03
Zone suburbaine	9	0,025
Zone suburbaine dense	12	0,02
Zone urbaine	20	0,02
Zone urbaine dense	25	0,02
Zone industrielle	20	0,05

Il ne faut pas considérer d'affaiblissements supplémentaires dus à l'occultation par des groupes d'obstacles (ou par la couverture du terrain) pour des catégories n'apparaissant pas dans le Tableau 6.



4.6.4 Méthode d'application

La méthode pour appliquer la correction de gain de surélévation, A_{ht} ou A_{hr} (dB), est une méthode simple. Elle est illustrée par la Fig. 3.

La méthode de prévision de base doit être complétée par les opérations suivantes:

Etape 1: Si l'on connaît la nature du groupe d'obstacles ou si l'on peut faire une hypothèse à ce sujet sans risque d'erreur, on appliquera la méthode principale pour calculer l'affaiblissement de transmission de référence jusqu'à la hauteur nominale h_a , pour le type de groupe d'obstacles considéré (choisi dans le Tableau 6). La longueur de trajet à prendre en compte est $d - d_k$ (km). Toutefois, si $d \gg d_k$, cette petite correction pour tenir compte de d_k peut être négligée sans risque d'erreur.

Etape 2: S'il existe un obstacle exerçant un «effet d'écran du terrain» qui assure une protection à la station terminale, on en tiendra compte dans le calcul de base, toutefois, l'affaiblissement par effet d'écran (A_{st} ou A_{sr} (dB)) devra être calculé jusqu'à la hauteur h_a à la distance d_s , et non jusqu'à h à la distance d_L , comme cela serait le cas autrement.

Etape 3: Après avoir appliqué complètement la méthode principale, on peut ajouter la correction pour le gain de surélévation d'après l'équation (27), comme indiqué dans le Tableau 5.

Etape 4: En l'absence d'informations sur le groupe d'obstacles, on effectuera le calcul de base en utilisant les distances d et d_L (le cas échéant) et la hauteur h .

NOTE 1 – S'il y a lieu, on ajoutera les corrections de gain de surélévation de groupe d'obstacles aux deux extrémités du trajet.

NOTE 2 – Dans certains cas, on a besoin d'appliquer la correction de gain de surélévation sur un trajet terrestre et également la correction pour le couplage de conduit sur un trajet maritime (A_{ct} ou A_{cr} (dB)) (l'antenne est proche de la mer, mais il y a un groupe d'obstacles entre les deux). En pareils cas, on appliquera les deux corrections ensemble car elles sont complémentaires et compatibles.

NOTE 3 – Ce modèle ne convient pas si d n'est pas nettement supérieur à d_k .

4.7 Prévision globale

Le Tableau 5 indique la marche à suivre pour effectuer la prévision globale relative à chaque type de trajet. Pour les trajets en visibilité directe ou en visibilité directe avec sous-trajet de diffraction, aucun prétraitement des résultats d'un modèle donné n'est requis avant d'appliquer les formules de ce Tableau.

4.7.1 Trajets transhorizons

Dans le cas de trajets transhorizons, on utilise pour le processus combinatoire l'affaiblissement fourni par le modèle en visibilité directe (équivalent du point de vue théorique), bien que l'utilisation de ce modèle ne soit pas obligatoire. La prévision globale est fondée sur le calcul de $L'_{ba}(p)$, affaiblissement modifié de propagation par conduits/réflexion sur des couches, grâce à la formule ci-après et avant application de l'équation (8c) du Tableau 5:

$$L'_{ba}(p) = L_{bda}(p) + (L_{min_{b0}}(p) - L_{bda}(p)) \cdot F_j \quad (28)$$

où:

$$L_{bda}(p) = \begin{cases} L_{bd}(p) & \text{pour } L_{min_{ba}}(p) > L_{bd}(p) \\ L_{min_{ba}}(p) + (L_{bd}(p) - L_{min_{ba}}(p)) \cdot F_k & \text{pour } L_{min_{ba}}(p) \leq L_{bd}(p) \end{cases} \quad (29)$$

$L_{bd}(p)$: affaiblissement de diffraction évalué pendant $p\%$ du temps grâce à l'équation (14)

F_k : facteur d'interpolation associant l'affaiblissement dû à la propagation par conduits/réflexion sur des couches à l'affaiblissement par diffraction proportionnel à la distance:

$$F_k = 1,0 - 0,5 \left(1,0 + \operatorname{tgh} \left(3,0 \cdot \frac{\kappa}{d_{sw}} (d - d_{sw}) \right) \right) \quad (30)$$

où:

d : longueur du trajet le long du grand cercle (définie dans le Tableau 3)

d_{sw} : paramètre constant déterminant la gamme des distances de transition (valeur fixée à 20)

κ : paramètre constant déterminant la pente de la méthode aux extrémités de la gamme (valeur fixée à 0,5).

$Lmin_{ba}(p)$: valeur modifiée de l'affaiblissement dû à la propagation par conduits/réflexion sur des couches:

$$Lmin_{ba}(p) = \eta \cdot \ln \left(\exp \left(\frac{L_{ba}(p)}{\eta} \right) + \exp \left(\frac{L_{b0}(p)}{\eta} \right) \right) \quad (31)$$

où:

$L_{ba}(p)$: affaiblissement dû à la propagation par conduits/réflexion sur des couches, donné par l'équation (16)

$L_{b0}(p)$: affaiblissement théorique sur le trajet en visibilité directe évalué grâce à l'équation (16)

$$\eta = 2,5$$

$Lmin_{b0}(p)$: valeur théorique minimale de l'affaiblissement de propagation que peut atteindre l'affaiblissement modifié dû à la propagation par conduits/réflexion sur des couches:

$$Lmin_{b0}(p) = \begin{cases} L_{b0}(p) & \text{pour } p < \beta_0 \\ L_{bd50} - (L_{bd50} - L_{b0\beta}) \cdot F_i & \text{pour } p \geq \beta_0 \end{cases} \quad (32)$$

où:

$L_{b0\beta}$: affaiblissement théorique en visibilité directe évalué pour $\beta_0\%$ du temps grâce à l'équation (9):

$$L_{b0\beta} = L_{b0}(\beta_0\%) \quad (33)$$

L_{bd50} : affaiblissement de diffraction évalué pour 50% de temps grâce à l'équation (14):

$$L_{bd50} = L_{bd}(50\%) \quad (34)$$

F_i : facteur d'interpolation fondé sur une distribution log-normale de l'affaiblissement dû à la diffraction, donné par le formule (13c)

F_j : facteur d'interpolation combinant l'affaiblissement modifié dû à la propagation par conduits/réflexion sur des couches à l'affaiblissement théorique en visibilité directe:

$$F_j = 1,0 - 0,5 \left(1,0 + \operatorname{tgh} \left(3,0 \cdot \frac{\xi}{\Theta} (\theta - \Theta) \right) \right) \quad (35)$$

où:

$$\Theta = 0,3$$

$$\xi = 0,8$$

θ : distance angulaire du trajet, définie dans le Tableau 7.

4.8 Calcul de l'affaiblissement de transmission

La méthode décrite ci-dessus (§ 4.2 à § 4.7) donne l'affaiblissement de transmission de référence entre les deux stations. Pour calculer le niveau de signal reçu dans une station par suite du brouillage imputable à l'autre station, il faut connaître l'affaiblissement de transmission, qui tient compte des gains d'antenne des deux stations dans la direction du trajet radioélectrique (en l'occurrence, le trajet de brouillage) qui les relie.

La procédure qui suit fournit une méthode pour le calcul de l'affaiblissement de transmission entre deux stations de Terre. Etape intermédiaire de la méthode, elle fournit aussi des formules pour le calcul de la longueur du trajet le long du grand cercle et pour le calcul de la distance angulaire du trajet. Ces formules reposent sur les coordonnées géographiques des stations, par opposition au calcul de ces valeurs effectué à partir du profil du trajet, selon l'hypothèse formulée dans le Tableau 3.

On calcule la distance angulaire du trajet θ à partir des coordonnées géographiques des stations, en utilisant la formule suivante:

$$\theta = \arccos(\sin(\varphi_t) \sin(\varphi_r) + \cos(\varphi_t) \cos(\varphi_r) \cos(\psi_t - \psi_r)) \quad \text{rad} \quad (36)$$

d , distance entre les stations le long du grand cercle, est égale à:

$$d = 6371 \cdot \theta \quad \text{km} \quad (37)$$

On calcule l'angle azimutal (direction azimutale suivant le nord géographique, dans le sens des aiguilles d'une montre) de la station t à la station r en utilisant l'expression suivante:

$$\alpha_{tr} = \arccos(\{\sin(\varphi_r) - \sin(\varphi_t) \cos(\theta)\} / \sin(\theta) \cos(\varphi_t)) \quad \text{rad} \quad (38)$$

Après avoir appliqué l'expression (38), si $\psi_t - \psi_r < 0$; alors:

$$\alpha_{tr} = 2\pi - \alpha_{tr} \quad \text{rad} \quad (39)$$

On calcule l'angle azimutal de la station r à la station t , α_{rt} , par symétrie à partir des équations (38) et (39).

On suppose ensuite que la direction du faisceau principal (axe de visée) de la station t est donnée par les angles d'élévation et de visée (ε_t , α_t), et que la direction du faisceau principal de la station r est désignée par les angles (ε_r , α_r). Pour obtenir les angles d'élévation du trajet radioélectrique (en l'occurrence, le trajet de brouillage) relatifs aux stations t et r , notés respectivement ε_{pt} et ε_{pr} , il faut opérer une distinction entre les trajets en visibilité directe et les trajets transhorizon. Par exemple, pour les trajets en visibilité directe :

$$\varepsilon_{pt} = [(h_r - h_t)/d] - [d/2a_e] \quad \text{rad} \quad (40a)$$

et

$$\varepsilon_{pr} = [(h_t - h_r)/d] - [d/2a_e] \quad \text{rad} \quad (40b)$$

où h_t et h_r sont les hauteurs des stations au-dessus du niveau moyen de la mer (km), tandis que pour les trajets transhorizon, les angles d'élévation sont donnés par leur angle respectif par rapport à l'horizon, à savoir:

$$\varepsilon_{pt} = \theta_t \times 10^3 \quad \text{rad} \quad (41a)$$

et

$$\varepsilon_{pr} = \theta_r \times 10^3 \quad \text{rad} \quad (41b)$$

Il faut garder à l'esprit que les angles par rapport à l'horizon radioélectrique, θ_t et θ_r , sont définis respectivement aux § 5.1.1 et § 5.1.3 de l'Appendice 1.

Pour calculer les angles (notés respectivement χ_t et χ_r) entre les axes de visée des stations t et r , et la direction du trajet de brouillage au niveau des stations t et r , il est recommandé d'utiliser l'expression suivante:

$$\chi_t = \arccos(\cos(\varepsilon_t) \cos(\varepsilon_{pt}) \cos(\alpha_{tr} - \alpha_t) + \sin(\varepsilon_t) \sin(\varepsilon_{pt})) \quad (42a)$$

et

$$\chi_r = \arccos(\cos(\varepsilon_r) \cos(\varepsilon_{pr}) \cos(\alpha_{rt} - \alpha_r) + \sin(\varepsilon_r) \sin(\varepsilon_{pr})) \quad (42b)$$

En utilisant leur angle respectif par rapport à l'axe de visée, on obtient les gains d'antenne des stations t et r , notés respectivement G_t et G_r (dB). Si les diagrammes de rayonnement réels des antennes ne sont pas disponibles, on peut obtenir la variation du gain en fonction de l'angle par rapport à l'axe de visée, à partir des informations contenues dans la Recommandation UIT-R S.465.

Pour obtenir l'affaiblissement de transmission, L , on utilise la formule suivante:

$$L = L_{b0}(p) - G_t - G_r \quad \text{dB} \quad (43)$$

Dans le cas de scénarios de brouillages par temps clair pour lesquels la propagation radioélectrique est dominée par la diffusion troposphérique, les angles d'élévation seront légèrement supérieurs aux angles par rapport à l'horizon radioélectrique, θ_t et θ_r . L'utilisation de ces derniers ne devrait introduire qu'une erreur négligeable, à moins qu'ils ne coïncident également avec les directions d'axe de visée de leur station respective.

5 Prévion des brouillages dus à la diffusion par les hydrométéores

Par opposition aux méthodes précédentes de prévion des brouillages par temps clair décrites plus haut, la méthode (décrite ci-après) de prévion des brouillages dus à la diffusion par les hydrométéores fournit directement une expression pour l'affaiblissement de transmission, car cette méthode s'appuie sur une certaine connaissance des gains d'antenne brouilleuse et brouillée.

5.1 Introduction

Ce modèle calcule des statistiques de l'affaiblissement de transmission du signal brouilleur à partir de statistiques de l'intensité de la pluie (le logiciel correspondant (SCAT) est disponible auprès du BR de l'UIT). Il s'appuie sur deux hypothèses fondamentales:

- la diffusion se produit uniquement à l'intérieur de cellules ayant une section transversale circulaire, dont le diamètre dépend de l'intensité de la pluie à l'intérieur de la cellule. Quelle que soit la géométrie du trajet, on suppose qu'il y a une cellule dans une position fixe, qui est censée représenter le cas le plus défavorable. A l'intérieur de la cellule de pluie, l'intensité de la pluie et donc aussi la réflectivité sont constantes jusqu'à une hauteur de pluie dont la valeur moyenne dépend de la latitude géographique, mais avec une distribution spécifique autour de cette moyenne qui reflète la variation annuelle de cette hauteur. Au-dessus de cette hauteur, la réflectivité (dB) est supposée décroître de façon linéaire;
- l'affaiblissement se produit aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de la cellule, mais uniquement au-dessous de la hauteur de pluie. A l'intérieur de la cellule, on utilise la relation bien connue entre l'affaiblissement linéique et l'intensité de la pluie.

Ce modèle permet de calculer les niveaux de brouillage, pour des géométries de trajets longs (>100 km) et courts (jusqu'à quelques kilomètres), pour des angles d'élévation arbitraires aux deux extrémités, pour une diffusion latérale (autre que sur le grand cercle) et un couplage des lobes latéraux. A cause de la complexité de la géométrie du trajet, le modèle est fourni sous forme d'une application informatique type.

La base physique de la méthode, exposée dans l'Appendice 3, suppose l'intersection d'un faisceau étroit (par exemple, une station terrienne) et d'un faisceau large (par exemple, une station de Terre).

Les comparaisons avec des mesures directes ou par radar ont montré que la méthode donne de bons résultats pour diverses fréquences et géométries.

5.2 Formules de l'affaiblissement de transmission

L'affaiblissement de transmission, L (dB), dû à la diffusion par les hydrométéores, peut être exprimé pour une intensité de la pluie et une hauteur de pluie données comme suit:

$$L = 197 - 10 \log \eta_E + 20 \log d_T - 20 \log f - 10 \log z_R + 10 \log S + A_g - 10 \log C \quad \text{dB} \quad (44)$$

où:

η_E : rendement d'antenne de la station terrienne (facteur < 1)

d_T : distance entre stations via le volume de diffusion (km)

f : fréquence (GHz)

z_R : facteur de réflectivité par unité de volume pour la diffusion par la pluie au-dessous de la hauteur de pluie (mm^6/m^3):

$$z_R = 400 R(p)^{1,4} \quad \text{mm}^6/\text{m}^3 \quad (45)$$

$R(p)$: intensité de la pluie ponctuelle dépassée pendant le pourcentage du temps p considéré (avec un temps d'intégration de 1 min)

S : tolérance pour tenir compte de l'écart par rapport à la diffusion par la pluie selon la loi de Rayleigh, au-dessus de 10 GHz, (on suppose $S = 0$ au-dessus de la hauteur de pluie):

$$10 \log S = R(p)^{0,4} \times 10^{-3} \left[4 (f - 10)^{1,6} \left(\frac{1 + \cos \varphi_s}{2} \right) + 5 (f - 10)^{1,7} \left(\frac{1 - \cos \varphi_s}{2} \right) \right] \quad \text{dB} \quad \text{pour } f > 10 \text{ GHz} \quad (46a)$$

$$10 \log S = 0 \quad \text{dB} \quad \text{pour } f \leq 10 \text{ GHz} \quad (46b)$$

φ_s : angle de diffusion, c'est-à-dire angle entre la direction d'arrivée vers le volume diffusant et la direction de sortie de celui-ci (par exemple, $\varphi_s = 0^\circ$ pour la diffusion vers l'avant et $\varphi_s = 180^\circ$ pour la rétrodiffusion)

A_g : affaiblissement gazeux par l'oxygène et la vapeur d'eau, calculée en utilisant les formules données dans la Recommandation UIT-R P.676 et pour une concentration en vapeur d'eau de $7,5 \text{ g}/\text{m}^3$

C : fonction de transfert effective de diffusion donnée par:

$$C = g_{T0} \int_{h_{min}}^{h_{max}} g_T(h) \zeta(h) A_T(h) A_E(h) \frac{1}{\sin \varepsilon_E} dh \quad (47)$$

où:

h_{min}, h_{max} : hauteurs minimale et maximale pour l'intégration

g_{T0} : gain dans l'axe de l'antenne de la station de Terre

g_T : directivité (facteur ≤ 1) de l'antenne de la station de Terre en direction du point d'intégration (volume élémentaire) considéré

ε_E : angle d'élévation du faisceau de la station terrienne

$\zeta(h)$: fonction de réflectivité à l'intérieur du volume de diffusion, normalisée par rapport à z_R (la valeur en dessous de la hauteur de pluie) donnée par:

$$\zeta(h) = 1 \quad \text{pour } h \leq \text{hauteur de pluie} \quad (48a)$$

$$\zeta(h) = 10^{-0,65(h - h_R)} \quad \text{pour } h > \text{hauteur de pluie} \quad (48b)$$

où:

h_R : hauteur moyenne de pluie comme précisé dans la Recommandation UIT-R P.839 (voir Appendice 3)

A_T, A_E : affaiblissements dus à la pluie (facteurs ≤ 1) pour les trajets, respectivement depuis la station de Terre jusqu'au point d'intégration et de ce point jusqu'à la station terrienne. Les renseignements donnés à l'Appendice 3 sont nécessaires pour le calcul de A_T et de A_E .

Dans l'équation (44), on suppose un couplage de polarisation (maximal) correspondant au cas le plus défavorable. Pour un couplage plus faible que ce couplage parfait, l'affaiblissement sera plus élevé (voir l'Appendice 3).

Pour calculer l'affaiblissement de transmission global, l'intégrale l'équation (47) doit être calculée le long du faisceau d'antenne de la station terrienne qui est soit à l'intérieur de la cellule de pluie, soit à l'intérieur du faisceau d'antenne de la station de Terre (zone sombre sur la Fig. 9).

On suppose que le faisceau d'antenne de la station de Terre a une forme gaussienne. L'intégration est calculée jusqu'aux points à -18 dB du diagramme de rayonnement, par rapport au gain maximal trouvé le long du faisceau étroit. Pour obtenir une expression analytique de l'intégrale, on utilise une fonction approchée gaussienne du diagramme de rayonnement de l'antenne de T :

$$g_T(h) = \exp \left[-4 \ln 2 \left(\frac{h - h_0}{\Delta h_{1/2}} \right)^2 \right] \quad (49)$$

où $\Delta h_{1/2}$ est la différence entre les hauteurs des deux points, le long de l'axe de l'antenne de la station terrienne, où la fonction de directivité de l'antenne de la station de Terre tombe à 0,5 (points à -3 dB).

5.3 Distribution cumulative de l'affaiblissement de transmission

La distribution cumulative (annuelle) de l'affaiblissement de transmission dû à la diffusion par les hydrométéores est évaluée en deux étapes.

En premier lieu, pour chaque combinaison d'intensité de pluie et de hauteur de pluie, on calcule l'affaiblissement de transmission comme s'il y avait une dépendance déterministe entre ces deux paramètres. On suppose que la probabilité d'occurrence de cette valeur de l'affaiblissement de transmission est la même que celle de la combinaison correspondante (intensité de pluie/hauteur de pluie), en supposant une indépendance statistique de ces deux paramètres.

En second lieu, les probabilités de toutes les combinaisons (intensité de pluie/hauteur de pluie) donnant lieu à la même valeur de l'affaiblissement de transmission sont additionnées pour fournir la probabilité totale de cet affaiblissement de transmission. La distribution cumulative résultante est prise comme distribution prévisionnelle, bien qu'il n'y ait pas une corrélation bijective entre les combinaisons individuelles (intensité de pluie/hauteur de pluie) et l'affaiblissement de transmission.

5.4 Prévisions pour le mois le plus défavorable

En Europe, on a constaté que les facteurs d'échelle Q pour le mois le plus défavorable, pour la diffusion par les hydrométéores, étaient d'environ 3 pour 1% du temps, 4,5 pour 0,01% du temps et 7 pour 0,001% du temps. Ces valeurs, fondées sur un nombre limité de données à des fréquences supérieures ou égales à 11 GHz, doivent être utilisées avec prudence. On a constaté que les valeurs moyennes étaient très proches des facteurs relatifs à l'intensité de pluie en Europe. C'est pourquoi il est proposé, en l'absence de valeurs mesurées de Q pour la diffusion par les précipitations, d'utiliser les valeurs de Q pour l'intensité de pluie (voir la Recommandation UIT-R P.841, pour des tables des valeurs de Q).

A titre d'exemple, dans des mesures effectuées au Royaume-Uni sur un trajet de 131 km à 11 GHz, un affaiblissement de transmission de 141 dB était dépassé sur une base annuelle pendant (100% – 0,01%) du temps. En utilisant un facteur Q de 4,5, l'affaiblissement de propagation de 139,3 dB qui était dépassé pour (100% – 0,002%) de la distribution annuelle, correspondrait à 0,01% du mois le plus défavorable, soit une diminution de l'affaiblissement de 1,7 dB.

En principe, ces facteurs relatifs au mois le plus défavorable devraient tenir compte de la couche de fusion, mais des simulations sur modèle ont montré que le brouillage dû à cette couche pouvait être important si elle est centrée sur le volume commun d'intersection des faisceaux principaux pendant une période de temps significative, par exemple pendant le «mois le plus défavorable». Ce brouillage, fonction de la fréquence, est plus important aux fréquences basses, telles que 4-6 GHz, qu'aux fréquences élevées. Les mesures faites sur un trajet de 131 km à 11,2 GHz (zone hydrométéorologique composite C, D, E) ont montré que, par rapport à l'accroissement attendu dans les statistiques saisonnières en l'absence de couche de fusion, la présence de celle-ci en été augmentait les niveaux de brouillage de 2 à 3 dB pour les pourcentages de temps compris entre 0,1% et 0,01%. A 5 GHz, l'augmentation transposée par similitude du niveau de brouillage dû à la présence de la couche de fusion serait de 3 à 4 dB. L'augmentation du niveau de brouillage pour le mois le plus défavorable causé par la présence de couche de fusion serait légèrement plus forte que celle pour la saison la plus défavorable.

Appendice 1 à l'Annexe 1

Données radiométéorologiques nécessaires dans la procédure de prévision par temps clair

1 Introduction

Les procédures de prévision par temps clair dépendent des données radiométéorologiques pour obtenir la variabilité en fonction de l'endroit. Ces données sont fournies sous forme de cartes contenues dans le présent Appendice.

2 Cartes de variation verticale des données du coïndice

Dans la procédure dite générale, les caractéristiques radiométéorologiques du trajet par temps clair utilisées sont, pour les mécanismes de brouillage continu (à long terme), la valeur annuelle moyenne de ΔN (la diminution de l'indice de réfraction dans le premier kilomètre de l'atmosphère) et, pour les mécanismes de brouillage anormaux (à court terme), le pourcentage du temps, $\beta_0\%$, pendant lequel le gradient de l'indice de réfraction dans la basse atmosphère est inférieur à -100 unités N/km. Ces paramètres forment une base suffisante pour établir les modèles des mécanismes de propagation par temps clair décrits au § 2 de l'Annexe 1. Pour certaines de ces quantités, les données sont fournies dans le présent Appendice pour les calculs annuels ou relatifs au mois le plus défavorable:

- la Fig. 4 fournit la moyenne annuelle de ΔN ;
- la Fig. 5 donne les contours du maximum de la valeur moyenne mensuelle de ΔN .

FIGURE 4
Valeurs moyennes annuelles de ΔN

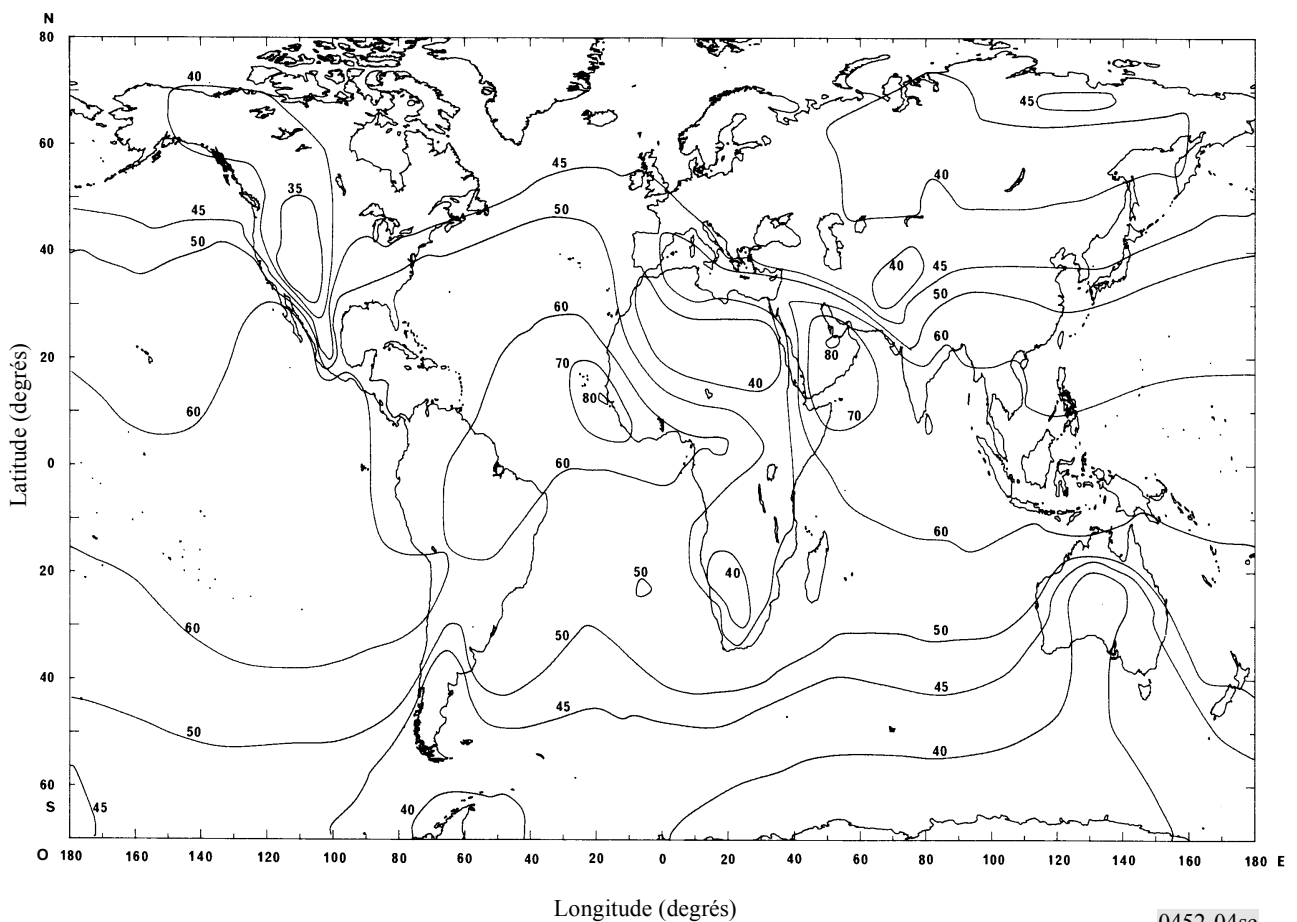
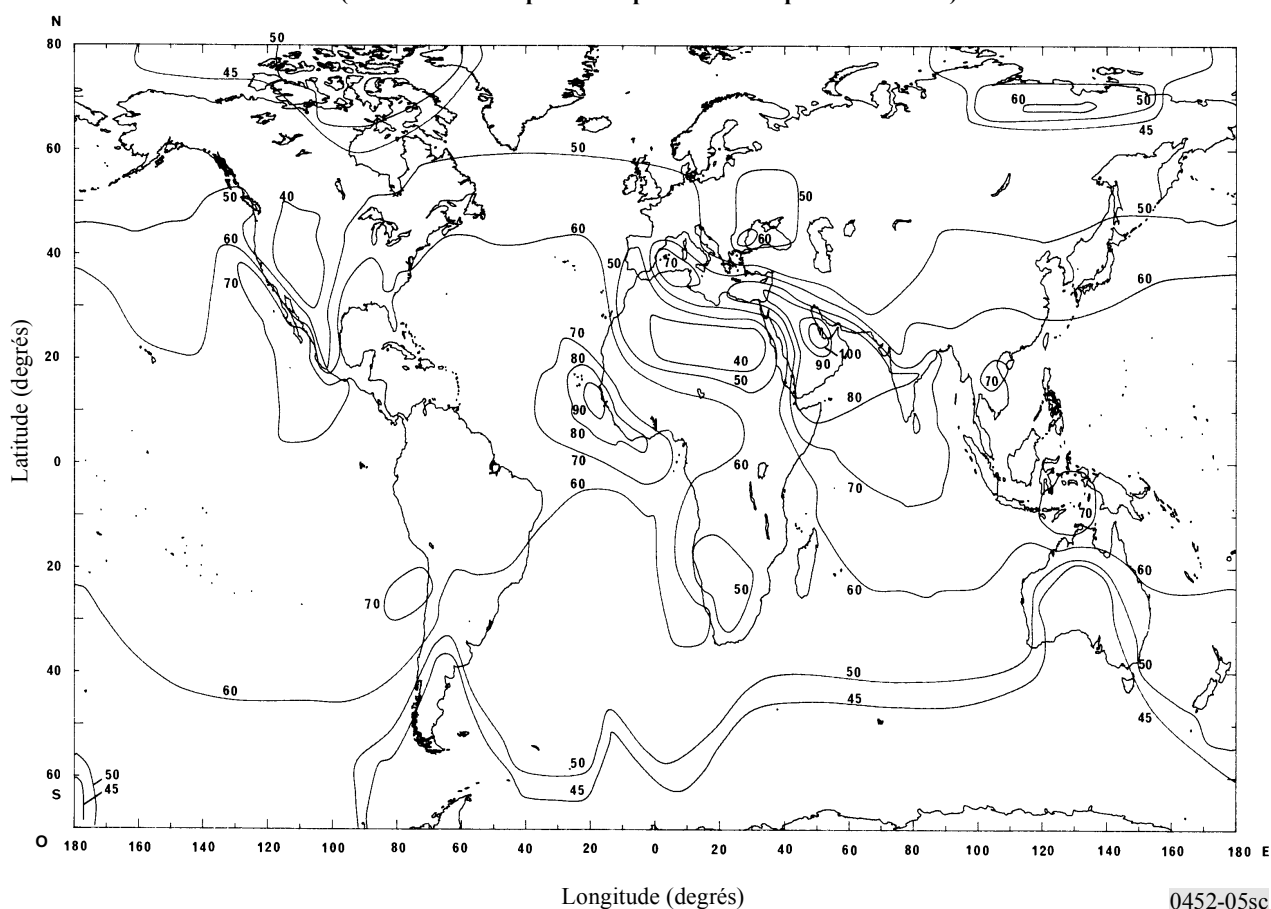


FIGURE 5

Valeur maximale de la moyenne mensuelle de ΔN
(à utiliser dans les prévisions pour le mois le plus défavorable)



0452-05sc

3 Carte du coïndice à la surface de la Terre, N_0

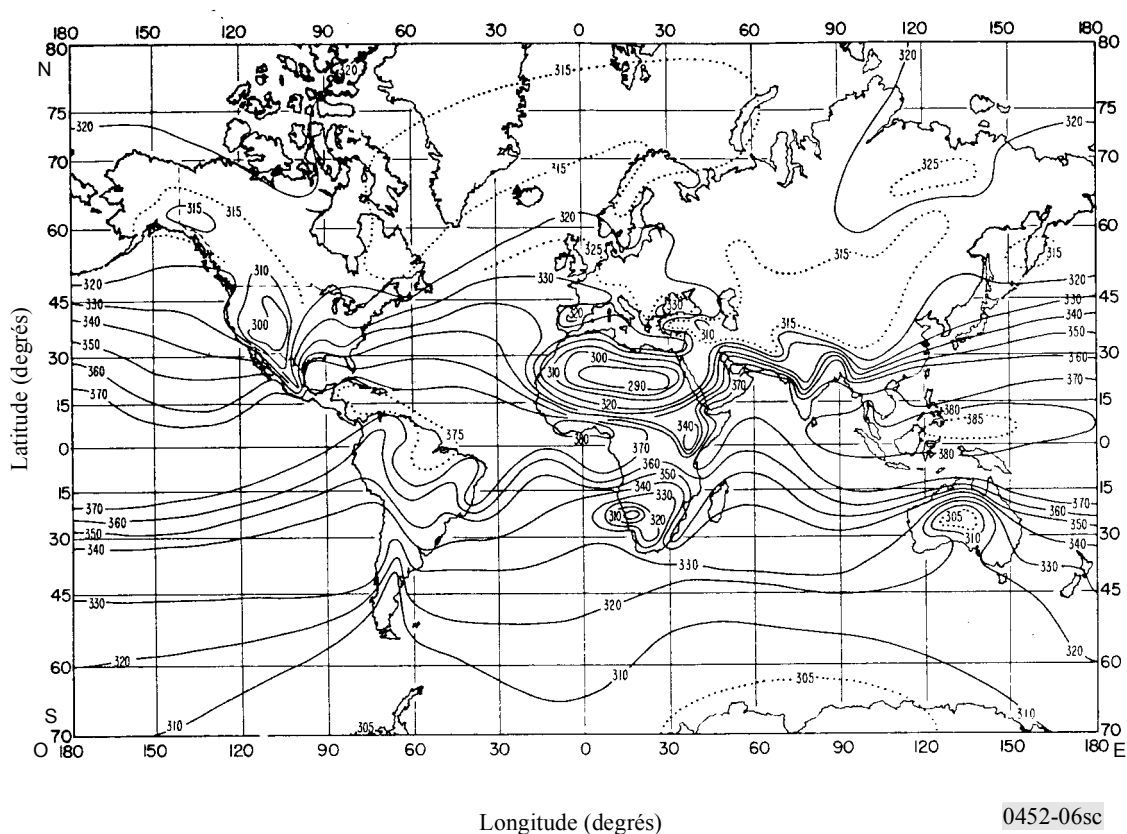
La carte du coïndice moyen au niveau de la mer, N_0 , applicable au modèle de diffusion troposphérique, est donnée à la Fig. 6.

4 Réalisation de cartes sous forme de bases de données informatiques

Pour l'informatisation des procédures, il est utile de saisir les données des cartes sous forme numérique et de les convertir en simples bases de données qui pourront être directement accessibles par le logiciel.

Pour les cartes mondiales relatives à l'indice de réfraction, il est suggéré de convertir les contours en tableaux à deux dimensions avec une résolution de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ en latitude et longitude. Pour éviter des discontinuités de la prévision lors de changements mineurs de l'endroit ou de la distance, les valeurs pour chaque cellule du tableau devraient être calculées par interpolation entre les contours.

FIGURE 6
Coïndice au niveau de la mer, N_0



Appendice 2 à l'Annexe 1

Analyse du profil du trajet

1 Introduction

Pour l'analyse du profil du trajet, il est nécessaire de disposer d'un profil des hauteurs du terrain le long du trajet au-dessus du niveau moyen de la mer (a-dnm). Les paramètres qui doivent être obtenus à partir de l'analyse du profil du trajet pour être utilisés dans les modèles de propagation sont donnés dans le Tableau 7.

2 Etablissement du profil du trajet

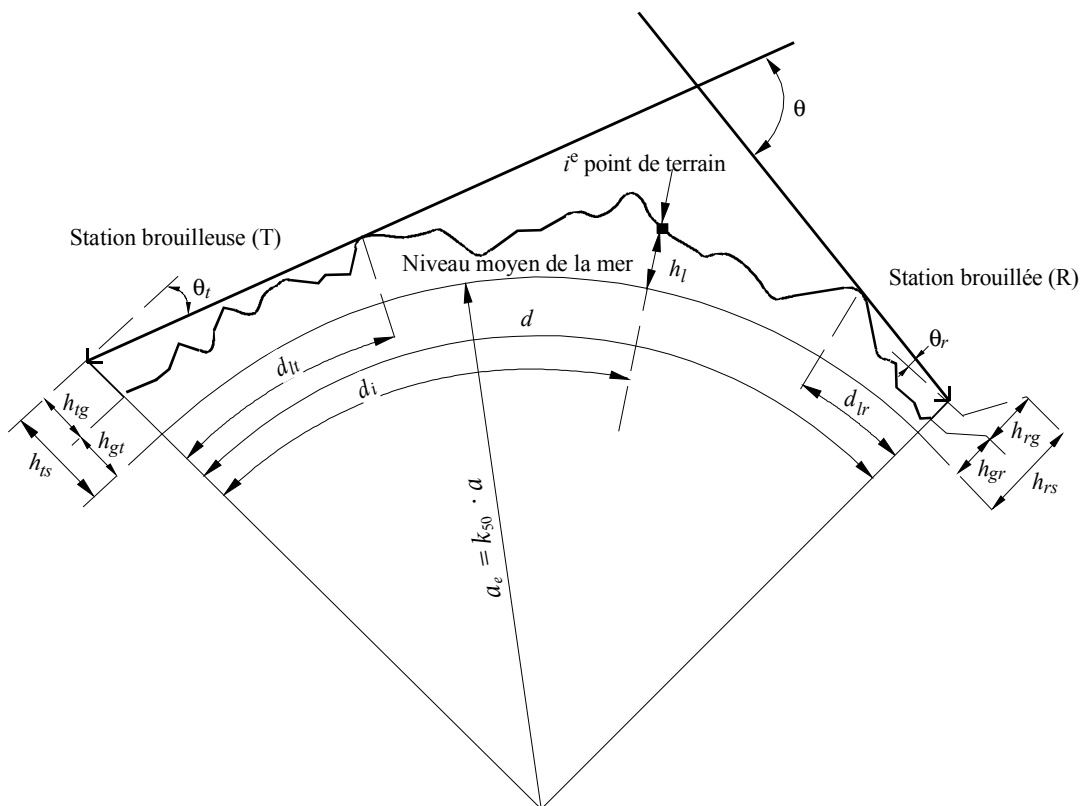
Partant des coordonnées géographiques de la station brouilleuse (ϕ_t, ψ_t) et de la station brouillée (ϕ_r, ψ_r) il faut, en utilisant une base de données topographiques ou des cartes de contours à grande échelle appropriées, trouver les hauteurs du terrain (par rapport au niveau moyen de la mer) le long du trajet selon le grand cercle. La résolution en distance préférée pour le profil est celle donnant un nombre entier de pas de 0,25 km environ. On peut, éventuellement au détriment de la précision,

utiliser un pas différent, mais sans dépasser la valeur de 1 km. Le profil doit comprendre comme points de départ et d'arrivée les hauteurs du sol aux emplacements de la station brouilleuse et de la station brouillée. On ajoutera aux hauteurs le long du trajet la correction tenant compte de la courbure de la Terre, en utilisant pour celle-ci le rayon a_e donné par l'équation (6).

Il est préférable d'utiliser des points de profil espacés régulièrement, mais il est possible d'utiliser la méthode avec des points espacés irrégulièrement. Cela peut être utile quand le profil est obtenu à partir d'une carte numérique de contours associés aux hauteurs du terrain. Toutefois, il convient de noter que la Recommandation a été élaborée à partir de mesures fondées sur des points de profil espacés régulièrement; on ne dispose d'aucune information concernant l'incidence de points espacés irrégulièrement sur la précision.

Dans la présente Recommandation, les points du profil du trajet correspondant à la station brouilleuse et à la station brouillée sont respectivement appelés point 0 et point n . Le profil du trajet comprend donc $n + 1$ points. La Fig. 7 illustre un exemple de profil des hauteurs a-dnm de terrain sur le trajet a-dnm ainsi que les divers paramètres relatifs aux terrains utilisés.

FIGURE 7
Exemple d'un profil de trajet (transhorizon)



Note 1 – La valeur θ_r ainsi représentée est négative.

0452-07

Le Tableau 7 définit les paramètres utilisés ou obtenus lors de l'analyse de profil du trajet.

TABLEAU 7

Définition des paramètres du profil du trajet

Paramètre	Description
a_e	Rayon équivalent de la Terre (km)
d	Longueur du trajet le long du grand cercle (km)
d_i	Distance le long du grand cercle, entre le $i^{\text{ème}}$ point du terrain et la station brouilleuse (km)
d_{ii}	Pas utilisé pour les données régulières du profil du trajet (km)
f	Fréquence (GHz)
λ	Longueur d'onde (m)
h_{ts}	Hauteur a-dnm de l'antenne de la station brouilleuse (m)
h_{rs}	Hauteur a-dnm de l'antenne de la station brouillée (m)
θ_t	Angle d'élévation de l'horizon (par rapport à l'horizontale locale) (mrad), mesuré à partir de l'antenne de la station brouilleuse
θ_r	Angle d'élévation de l'horizon (par rapport à l'horizontale locale) (mrad), mesuré à partir de l'antenne de la station brouillée
θ	Distance angulaire du trajet (mrad)
h_{st}	Hauteur a-dnm de la Terre régulière à l'emplacement de la station brouilleuse (m)
h_{sr}	Hauteur a-dnm de la Terre régulière à l'emplacement de la station brouillée (m)
h_i	Hauteur du $i^{\text{ème}}$ point du terrain a-dnm (m) h_0 : altitude du sol à la station brouilleuse h_n : altitude du sol à la station brouillée
h_m	Irrégularité du terrain (m)
h_{te}	Hauteur équivalente de l'antenne de la station brouilleuse (m)
h_{re}	Hauteur équivalente de l'antenne de la station brouillée (m)

3 Longueur du trajet

En général, la longueur du trajet, d (km), peut être obtenue à partir des données du profil du trajet par:

$$d = \sum_{i=1}^n (d_i - d_{i-1}) \quad \text{km} \quad (50)$$

cependant, pour des données du profil du trajet régulièrement espacées, l'expression est plus simple:

$$d = n \cdot d_{ii} \quad \text{km} \quad (51)$$

où d_{ii} est l'incrément de longueur sur le trajet (km).

4 Classification des trajets

Le profil du trajet doit ensuite être utilisé pour classer le trajet dans une des trois catégories géométriques, en se fondant sur le rayon équivalent de la Terre a_e . Les trajets de brouillage sont classés comme indiqué au Tableau 4.

4.1 Etape de classification 1: test pour un trajet transhorizon

Un trajet est dit transhorizon si l'angle d'élévation de l'horizon physique vu de l'antenne brouilleuse (par rapport à l'horizontale locale) est supérieur à l'angle sous-tendu par l'antenne brouillée (de nouveau par rapport à la même horizontale locale).

Pour qu'un trajet soit transhorizon il faut donc que:

$$\theta_{max} > \theta_{td} \quad \text{mrad} \quad (52)$$

où:

$$\theta_{max} = \max_{i=1}^{n-1} (\theta_i) \quad \text{mrad} \quad (53)$$

θ_i : angle d'élévation vers le $i^{\text{ème}}$ point du terrain

$$\theta_i = \frac{h_i - h_{ts}}{d_i} - \frac{10^3 d_i}{2 a_e} \quad \text{mrad} \quad (54)$$

où:

h_i : hauteur a-dnm (m) du $i^{\text{ème}}$ point du terrain

h_{ts} : hauteur a-dnm (m) de l'antenne de la station brouilleuse

d_i : distance de la station brouilleuse au $i^{\text{ème}}$ point du terrain (km)

$$\theta_{td} = \frac{h_{rs} - h_{ts}}{d} - \frac{10^3 d}{2 a_e} \quad \text{mrad} \quad (55)$$

où:

h_{rs} : hauteur a-dnm (m) de l'antenne de la station brouillée

d : longueur totale du trajet sur le grand cercle (km)

a_e : rayon médian équivalent de la Terre, approprié pour le trajet (équation (6)).

Si la condition de l'équation (52) est remplie, on peut alors poursuivre l'analyse du profil pour le cas d'un trajet transhorizon (voir le § 5.1). Dans ces conditions, l'Etape 2 de la classification du trajet n'est pas nécessaire.

Si la condition de l'équation (52) n'est pas remplie, le trajet est en visibilité directe, avec ou sans incursion du terrain dans la première zone de Fresnel.

4.2 Etape 2: test pour un trajet en visibilité directe avec diffraction par des obstacles situés sous le trajet (c'est-à-dire sans dégagement complet de la première zone de Fresnel)

Un trajet non transhorizon est un trajet en visibilité directe avec diffraction par des obstacles situés sous le trajet si l'angle d'élévation de l'horizon physique vu par l'antenne brouilleuse (par rapport à l'horizontale locale) et compte tenu d'un dégagement égal au rayon du premier ellipsoïde de Fresnel au point de l'horizon est supérieur à l'angle sous-tendu par l'antenne de la station brouillée (là aussi par rapport à l'horizontale locale de la station brouilleuse).

Il y a diffraction par des obstacles situés sous le trajet si:

$$\theta_{fmax} > \theta_{td} \quad \text{mrad} \quad (56)$$

où:

$$\theta_{fmax} = \max_{i=1}^{n-1} (\theta_{fi}) \quad (57)$$

Afin de terminer ce test, il faut dans l'équation (54) disposer d'un terme supplémentaire pour tenir compte du premier ellipsoïde de Fresnel. La Recommandation UIT-R P.526, § 2, donne le rayon de cet ellipsoïde, R_i (m) en un point quelconque du trajet:

$$R_i = 17,392 \sqrt{\frac{d_i(d - d_i)}{d \cdot f}} \quad \text{m} \quad (58)$$

où f est la fréquence (GHz).

On ajoute le rayon approprié, R_i (m) à chaque hauteur de terrain, h_i (m), dans l'équation (54), pour obtenir l'équation (59). Si l'on tient compte du dégagement de la première zone de Fresnel, θ_{fi} , l'angle d'élévation de l'antenne de la station (rad) sera donné par rapport au $i^{\text{ème}}$ point selon l'équation:

$$\theta_{fi} = \frac{(h_i + R_i) - h_{ts}}{d_i} - \frac{10^3 d_i}{2 a_e} \quad \text{mrad} \quad (59)$$

Si la condition de l'équation (56) est remplie, on peut alors poursuivre l'analyse de profil du trajet requise pour le cas de diffraction par des obstacles situés sous le trajet.

Si la condition de l'équation (56) n'est pas remplie, le trajet est un trajet en visibilité directe et l'on ne doit pas poursuivre davantage l'analyse du profil du trajet.

5 Calcul des paramètres à partir de l'analyse du profil du trajet

5.1 Trajets transhorizon

La liste complète des paramètres à établir à partir de l'analyse du profil du trajet est donnée dans le Tableau 7.

5.1.1 Angle d'élévation de l'horizon de l'antenne de la station brouilleuse, θ_t

L'angle d'élévation de l'horizon de l'antenne brouilleuse est l'angle d'élévation maximal calculé par la formule (53) appliquée à $n - 1$ hauteurs de profil de terrain.

$$\theta_t = \theta_{max} \quad \text{mrad} \quad (60)$$

θ_{max} étant déterminé comme dans l'équation (53).

5.1.2 Distance de l'horizon de l'antenne de la station brouilleuse, d_{lt}

La distance de l'horizon de l'antenne brouilleuse est la distance minimale depuis l'émetteur correspondant à l'angle d'élévation maximal de l'horizon de l'antenne calculé à l'aide de la formule (53).

$$d_{lt} = d_i \quad \text{km} \quad \text{pour max} (\theta_i) \quad (61)$$

5.1.3 Angle d'élévation de l'horizon de l'antenne de la station brouillée, θ_r

L'angle d'élévation de l'horizon de l'antenne brouillée est l'angle d'élévation maximal de l'horizon de l'antenne, calculé par la formule (53) appliquée à $n - 1$ hauteurs de profil de terrain.

$$\theta_r = \max_{j=1}^{n-1} (\theta_j) \quad \text{mrad} \quad (62)$$

$$\theta_j = \frac{h_j - h_{rs}}{d - d_j} - \frac{10^3 (d - d_j)}{2 a_e} \quad \text{mrad} \quad (63)$$

5.1.4 Distance de l'horizon de l'antenne de la station brouillée, d_{lr}

La distance de l'horizon de l'antenne brouillée est la distance minimale depuis le récepteur correspondant à l'angle d'élévation maximal de l'horizon de l'antenne, calculée à l'aide de la formule (53).

$$d_{lr} = d - d_j \quad \text{km} \quad \text{pour } \max (\theta_j) \quad (64)$$

5.1.5 Distance angulaire, θ (mrad)

$$\theta = \frac{10^3 d}{a_e} + \theta_t + \theta_r \quad \text{mrad} \quad (65)$$

5.1.6 Modèle de la «Terre régulière» et hauteurs équivalentes des antennes

5.1.6.1 Généralités

Pour déterminer la hauteur équivalente des antennes, ainsi que pour permettre une évaluation appropriée de l'irrégularité du terrain sur le trajet, il est nécessaire de définir la surface effective d'une «Terre régulière» comme un plan de référence au-dessus duquel le terrain irrégulier sur le trajet est supposé exister. Une fois que cela a été fait, on peut obtenir les valeurs du paramètre d'irrégularité du terrain (§ 5.1.6.4) et des hauteurs équivalentes des antennes brouilleuse et brouillée.

5.1.6.2 Exceptions

Pour des trajets «directs» au-dessus de la mer (c'est-à-dire $\omega \geq 0,9$), et lorsque les horizons des deux antennes sont la surface de la mer, le calcul de la surface de la Terre régulière peut être omis si nécessaire. Dans un tel cas, on peut prendre comme plan de référence le niveau moyen de la mer (ou de l'eau) sur toute la longueur du trajet, l'irrégularité du terrain est supposée être nulle (0 m) et les hauteurs équivalentes des antennes sont leurs hauteurs vraies au-dessus de la mer.

Pour tous les autres trajets, il est nécessaire d'appliquer la procédure d'approximation de la Terre régulière (§ 5.1) et de déterminer les hauteurs équivalentes des antennes et l'irrégularité du terrain (§ 5.1.6.4).

5.1.6.3 Calcul de la surface de la Terre régulière

On calcule une approximation linéaire des hauteurs du terrain au-dessus du niveau moyen de la mer:

$$h_{si} = h_{st} + m \cdot d_i \quad \text{m} \quad (66)$$

où:

- h_{si} : hauteur a-dnm (m) d'une surface ajustée par la méthode des moindres carrés à une distance d_i (km) de la source brouilleuse
- h_{st} : hauteur a-dnm (m) de la surface de la Terre régulière au départ du trajet, c'est-à-dire pour la station brouilleuse
- m : pente (m/km) de la surface ajustée par la méthode des moindres carrés, par rapport au niveau de la mer.

Deux méthodes sont disponibles pour les deux étapes suivantes du calcul. Les équations (67a) et (68a) peuvent être utilisées si les points du profil sont espacés régulièrement. Les équations (67b) et (68b), qui sont plus compliquées, doivent être utilisées si les points du profil sont espacés irrégulièrement et peuvent être utilisées dans l'autre cas.

Pour les profils de points espacés régulièrement:

$$m = \frac{\sum_{i=0}^n (h_i - h_a) \left(d_i - \frac{d}{2} \right)}{\sum_{i=0}^n \left(d_i - \frac{d}{2} \right)^2} \quad \text{m/km} \quad (67a)$$

Pour tout autre profil:

$$m = \left(\frac{1}{d^3} \right) \sum_{i=1}^n 3 (d_i - d_{i-1}) (d_i + d_{i-1} - d) (h_i + h_{i-1} - 2h_a) + (d_i - d_{i-1})^2 (h_i - h_{i-1}) \quad \text{m/km} \quad (67b)$$

où:

- h_i : hauteur vraie a-dnm (m) du $i^{\text{ème}}$ point du terrain
- h_a : moyenne des hauteurs réelles a-dnm sur le trajet, bornes h_0 et h_n comprises, donnée par:

Pour les profils de points espacés régulièrement:

$$h_a = \frac{1}{n+1} \sum_{i=0}^n h_i \quad \text{m} \quad (68a)$$

Pour tout autre profil, une moyenne pondérée est calculée:

$$h_a = \left(\frac{1}{2d} \right) \sum_{i=1}^n (d_i - d_{i-1}) (h_i + h_{i-1}) \quad \text{m} \quad (68b)$$

La hauteur h_{st} de la surface de la Terre régulière, à l'emplacement de la station brouilleuse, est donnée par:

$$h_{st} = h_a - m \frac{d}{2} \quad \text{m} \quad (69)$$

Il s'ensuit que la hauteur h_{sr} de la surface de la Terre régulière, à l'emplacement de la station brouillée, est donnée par:

$$h_{sr} = h_{st} + m \cdot d \quad \text{m} \quad (70)$$

Une correction doit être apportée si les hauteurs dans le cas d'une Terre régulière sont plus grandes que les hauteurs réelles:

$$h_{st} = \min (h_{st}, h_0) \quad \text{m} \quad (71a)$$

$$h_{sr} = \min (h_{sr}, h_n) \quad \text{m} \quad (71b)$$

Si l'une de ces deux hauteurs ou les deux ont dû être corrigées à l'aide des équations (71a) ou (71b), il faut également corriger la valeur de la pente m par la formule:

$$m = \frac{h_{sr} - h_{st}}{d} \quad \text{m/km} \quad (72)$$

5.1.6.4 Irrégularité du terrain, h_m

Le paramètre d'irrégularité du terrain, h_m (m), est la hauteur maximale du terrain au-dessus de la surface de la Terre régulière pour la section du trajet comprise entre les deux points d'horizon inclus:

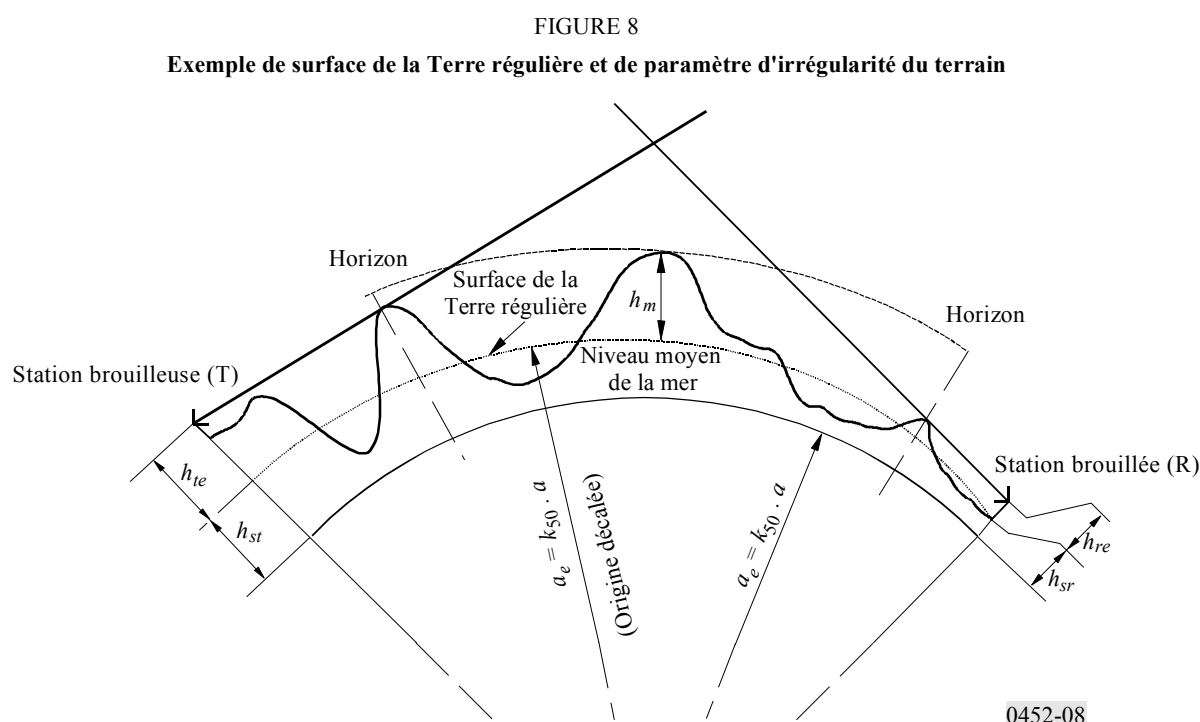
$$h_m = \max_{i=i_{lt}}^{i=i_{lr}} [h_i - (h_{st} + m \cdot d_i)] \quad \text{m} \quad (73)$$

où:

i_{lt} : indice du point du profil à une distance d_{lt} de l'émetteur

i_{lr} : indice du point du profil à une distance d_{lr} du récepteur.

Les notions de surface de la Terre régulière et de paramètre d'irrégularité du terrain h_m , sont illustrées sur la Fig. 8.



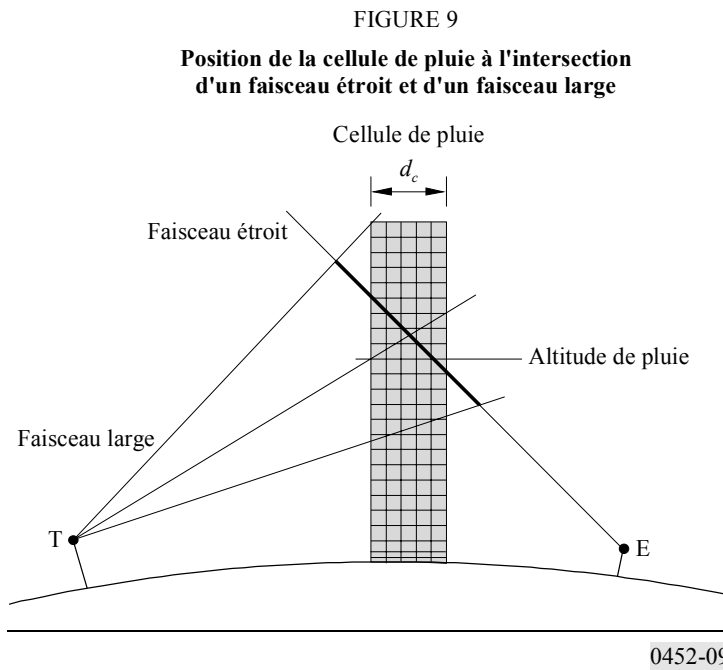
Appendice 3 à l'Annexe 1

Bases physiques du modèle de diffusion par les hydrométéores

On suppose que la diffusion se produit uniquement à l'intérieur d'une seule cellule cylindrique fixe de section circulaire. Le diamètre de la cellule, d_c , dépend de l'intensité de pluie, R (mm/h):

$$d_c = 3,3 R^{-0,08} \quad \text{km} \quad (74)$$

On suppose que la cellule est centrée à l'intersection des axes des deux antennes (ou au point le plus proche de ces deux axes s'ils ne se coupent pas) – voir la Fig. 9. Cette hypothèse est nécessaire pour pouvoir introduire dans le modèle la géométrie de trajets courts. A l'intérieur de la cellule et pour une certaine intensité de pluie, on suppose que la réflectivité est constante jusqu'à l'altitude de pluie (ou altitude de congélation). Au-dessus de l'altitude de pluie, la réflectivité décroît à raison de 6,5 dB/km. On suppose que la pluie en dehors de la cellule ne contribue pas singulièrement à la diffusion.



On suppose que l'affaiblissement dû à la pluie n'agit qu'en dessous de l'altitude de pluie. A l'intérieur de la cellule, on applique pour l'affaiblissement linéique γ_R la formule $\gamma_R = kR^\alpha$. Les coefficients k et α dépendent de la fréquence, de la polarisation et de la direction de propagation de l'onde (angle d'élévation), et sont donnés dans la Recommandation UIT-R P.838. En ce qui concerne l'affaiblissement Γ_R en dehors de la cellule (entre le bord de la cellule et un point situé à une distance d), on admet une décroissance exponentielle donnée par:

$$\Gamma_R = \gamma_R r_m \frac{(1 - e^{-d/r_m})}{\cos \varepsilon} \quad (75)$$

où:

r_m : longueur d'échelle pour l'affaiblissement dû à la pluie, donnée par:

$$r_m = 600 R^{-0,5} 10^{-(R+1)^{0,19}} \quad (76)$$

ε : angle d'élévation.

L'équation (75) est valable si la totalité du trajet est en dessous de l'altitude de pluie. Si seulement une partie du trajet (entre des distances d_1 et d_2 à partir du bord de la cellule) est en dessous de l'altitude de pluie, on a:

$$\Gamma_R = \gamma_R r_m \frac{(e^{-d_1/r_m} - e^{-d_2/r_m})}{\cos \varepsilon} \quad (77)$$

L'affaiblissement dû à la pluie est supposé nul pour les parties du trajet qui sont au-dessus de l'altitude de pluie.

Du fait que la longueur d'échelle horizontale croît rapidement quand l'intensité de pluie décroît, la distinction entre la cellule et la pluie environnante devient floue pour les intensités de pluie inférieures à quelque 10 mm/h.

L'altitude de pluie est traitée comme une variable aléatoire, h_{RD} , qui suit une distribution donnée. Il est important d'inclure explicitement la variabilité de l'altitude de pluie dans la méthode de prévision. Comme l'affaiblissement dû à la pluie n'agit qu'en dessous de h_{RD} , un volume commun situé juste au-dessus de h_{RD} peut donner lieu à un affaiblissement de transmission beaucoup plus petit (brouillage plus intense) qu'un volume commun en dessous de h_{RD} , en dépit de la décroissance de la réflectivité au-dessus de h_{RD} . Ce n'est que pour un volume commun situé suffisamment au-dessus de h_{RD} que la décroissance de la réflectivité compense l'absence d'affaiblissement dû à la pluie et que l'affaiblissement de transmission recommence à croître. Si l'altitude de pluie est, au cours de l'année, tantôt au-dessus et tantôt en dessous du volume commun, la statistique annuelle de l'affaiblissement de transmission peut, dans le domaine des probabilités et des petits affaiblissements, être dominée par les effets de diffusion par la glace et par la neige. Ce résultat ne serait pas prévu si l'on utilisait une valeur fixe de l'altitude de pluie, supérieure à la hauteur du volume commun. Cet effet est le plus prononcé aux fréquences élevées et il pourrait être négligeable en dessous de 11 GHz.

La moyenne de la distribution de h_{RD} est égale à l'altitude de pluie moyenne, h_R , telle que donnée par la Recommandation UIT-R P.839. L'altitude de pluie moyenne h_R varie en fonction de la latitude de la station.

Une distribution cumulative de h_{RD} est donnée par le Tableau 8, mais il serait préférable d'utiliser des valeurs mesurées à long terme pour l'endroit considéré, si l'on en dispose.

La procédure doit utiliser la distribution d'intensité de pluie relative à la zone hydrométéorologique applicable selon la Recommandation UIT-R P.837, sauf si des mesures de la distribution de l'intensité de pluie effectuées localement sont disponibles. Chaque valeur de l'intensité de pluie donne lieu à un affaiblissement de transmission, lequel diminue pour de faibles intensités de pluie si l'intensité de pluie augmente, à cause de l'augmentation de la réflectivité. Cependant, pour un volume commun en dessous de l'altitude de pluie, l'affaiblissement dû à la pluie augmente également avec l'intensité de pluie, ce qui peut compenser l'accroissement de la réflectivité. Par conséquent, l'affaiblissement minimal de transmission (pour un trajet en dessous de l'altitude de pluie) correspondra à une certaine intensité de pluie intermédiaire, laquelle diminue quand la fréquence augmente. C'est pour cette raison que l'obtention d'une distribution cumulative à partir de la loi liant l'affaiblissement de transmission à l'intensité de pluie demande une étape supplémentaire dans la prévision (voir le § 5.3).

TABLEAU 8

**Distribution cumulative de l'altitude de pluie
par rapport à sa valeur moyenne**

Différence d'altitude de pluie (km)	Probabilité de dépassement (%)
-2,125	100,0
-1,875	99,1
-1,625	96,9
-1,375	91,0
-1,125	80,0
-0,875	68,5
-0,625	56,5
-0,375	44,2
-0,125	33,5
0,0	28,5
0,125	24,0
0,375	16,3
0,625	10,2
0,875	6,1
1,125	3,4
1,375	1,8
1,625	0,9

On a utilisé l'approximation «faisceau étroit» dans laquelle on suppose qu'un des faisceaux d'antenne (celui de la station terrienne) est beaucoup plus étroit que l'autre (au voisinage de l'intersection) de sorte que les effets du gain d'antenne et de la largeur du faisceau se compensent mutuellement. Cependant, il est nécessaire d'introduire le facteur de rendement de l'antenne à faisceau étroit η_E (la valeur par défaut 0,6 est utilisée si l'on ne connaît pas la vraie valeur).

On suppose que le diagramme de rayonnement de l'antenne à large faisceau est de forme gaussienne. Pour tenir compte de l'effet du couplage des lobes latéraux, les lobes latéraux de l'antenne à faisceau large sont simulés par un deuxième faisceau, également de forme gaussienne, mais beaucoup plus large et de gain bien plus faible que le lobe principal, auquel il est ajouté. Le gain de ce deuxième faisceau est fixé à 1 dB en dessous du niveau maximal du lobe latéral le plus élevé, et sa largeur est choisie telle que, à la position de ce lobe le plus élevé, son gain soit 3 dB en dessous de celui de ce lobe. En d'autres termes, le gain g^* et la largeur φ^* du faisceau à mi-puissance (de part et d'autre) du diagramme de rayonnement représentant les lobes latéraux sont définis par:

$$g^* = g - \left| \delta_g \right| - 1 \quad \text{dB} \quad (78)$$

$$\varphi^* = \sqrt{6} \delta\varphi = 2,45 \delta\varphi \quad (79)$$

où:

- g : gain dans l'axe du lobe principal (dB)
- δ_g : gain relatif du lobe latéral le plus élevé (dB par rapport à g)
- $\delta\varphi$: position (angle par rapport à l'axe du faisceau principal) du lobe latéral le plus élevé (degrés).

Le gain dans l'axe du lobe principal doit être réduit légèrement pour tenir compte de la superposition du «faisceau du lobe latéral», de telle manière que la somme des deux gains correspond au gain réel de l'antenne.

Le couplage de polarisation dans l'équation (44) est supposé représenter un maximum. En pratique, la diffusion par la pluie est anisotrope et la polarisation du signal brouilleur diffusé peut être différente de celle de l'antenne réceptrice. La relation entre ces deux polarisations est en général complexe, dépendant des polarisations des antennes émettrice et réceptrice, de la géométrie globale du système et, dans une certaine mesure, de la forme des particules diffusantes. Lorsqu'un calcul préliminaire pour le couplage entre faisceaux principaux indique la possibilité d'un cas de brouillage, il devrait être possible en théorie de faire une évaluation plus précise du couplage en tenant compte des paramètres ci-dessus.

Appendice 4 à l'Annexe 1

Approximation de la fonction de distribution normale cumulative inverse pour $x \leq 0,5$

L'approximation donnée ci-après de la fonction de distribution normale cumulative inverse est valable pour $0,000001 \leq x \leq 0,5$, avec une erreur maximale de 0,00054. On peut l'utiliser en toute sécurité pour calculer la fonction d'interpolation dont l'expression est donnée par la formule (13a). Si $x < 0,000001$, ce qui suppose que $\beta_0 < 0,0001\%$, x doit être mis à 0,000001. La fonction $I(x)$ est alors donnée par:

$$I(x) = \xi(x) - T(x) \quad (80)$$

où:

$$T(x) = \sqrt{[-2 \ln(x)]} \quad (80a)$$

$$\xi(x) = \frac{[(C_2 \cdot T(x) + C_1) \cdot T(x)] + C_0}{[(D_3 \cdot T(x) + D_2) T(x) + D_1] T(x) + 1} \quad (80b)$$

$$C_0 = 2,515516698 \quad (80c)$$

$$C_1 = 0,802853 \quad (80d)$$

$$C_2 = 0,010328 \quad (80e)$$

$$D_1 = 1,432788 \quad (80f)$$

$$D_2 = 0,189269 \quad (80g)$$

$$D_3 = 0,001308 \quad (80h)$$