

UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

Recommandation UIT-R P.452-14
(10/2009)

**Méthode de prévision pour évaluer les
brouillages entre stations situées à la
surface de la Terre à des fréquences
supérieures à 0,1 GHz environ**

Série P
Propagation des ondes radioélectriques



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 l'Annexe 1 de 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 <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/fr>, où l'on trouvera également les Lignes directrices pour la mise en oeuvre 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

(Egalement disponible en ligne: <http://www.itu.int/publ/R-REC/fr>)

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	Emissions 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, 2010

© UIT 2010

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.452-14

Méthode de prévision pour évaluer les brouillages entre stations situées à la surface de la Terre à des fréquences supérieures à 0,1 GHz environ*

(Question UIT-R 208/3)

(1970-1974-1978-1982-1986-1992-1994-1995-1997-1999-2001-2003-2005-2007-2009)

Champ d'application

La présente Recommandation contient une méthode de prévision pour évaluer les brouillages entre des stations situées à la surface de la Terre à des fréquences supérieures à 0,1 GHz environ, compte tenu des brouillages par temps clair ou dus à la diffusion par les hydrométéores.

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 vers 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, 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, 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 0,1 GHz.

* Un tableau de logiciel associé aux procédures de prévision par temps clair décrites dans la présente Recommandation est disponible dans les pages du site web de l'UIT-R traitant de la Commission d'études 3 des radiocommunications.

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 vers 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.

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 radioélectriques 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 GHz et 50 GHz environ.

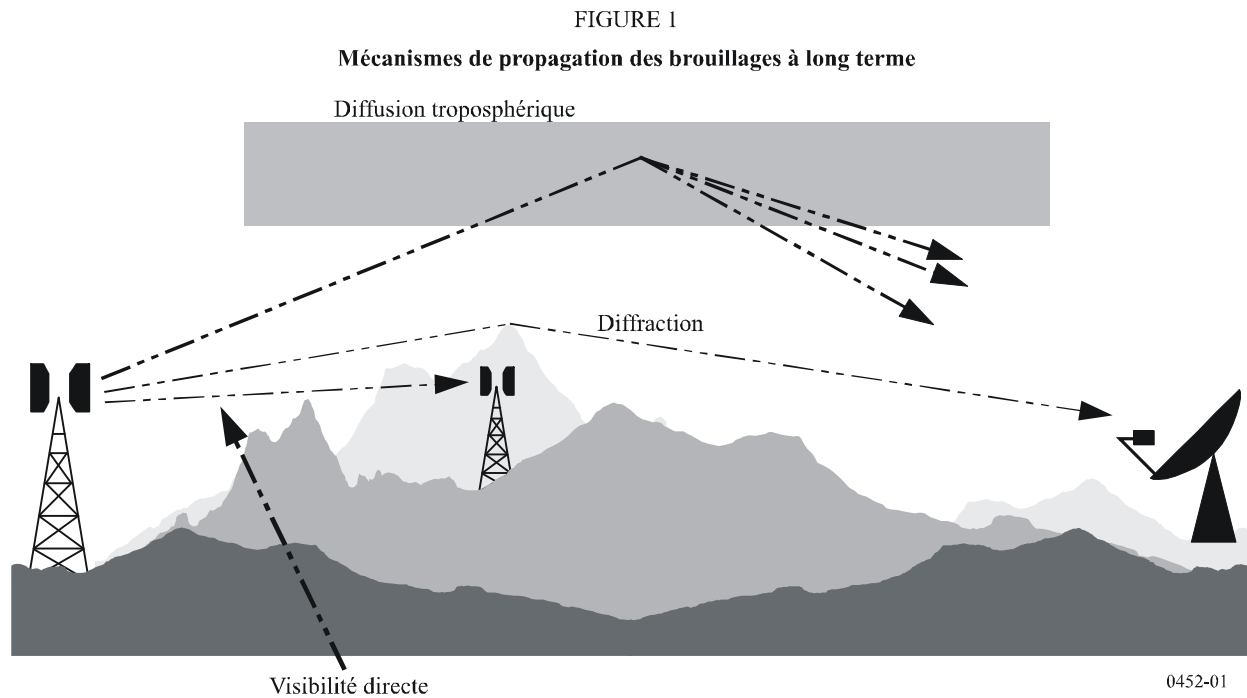
La méthode s'appuie sur une série complémentaire de modèles de propagation, ce qui assure que les prévisions couvrent tous les phénomènes importants de propagation de brouillage qui peuvent se présenter. Des méthodes d'analyse des caractéristiques radiométéorologiques et topographiques du trajet sont fournies, de telle sorte qu'il est possible de faire une prévision jusqu'à une distance limite de 10 000 km pour toute situation de brouillage réelle à laquelle s'applique la procédure.

2 Mécanismes de propagation des brouillages

Le brouillage fait intervenir un certain nombre de mécanismes de propagation dont l'importance relative dépend du climat, de la fréquence, du pourcentage de 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 (LoS, *line-of-sight*) 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).

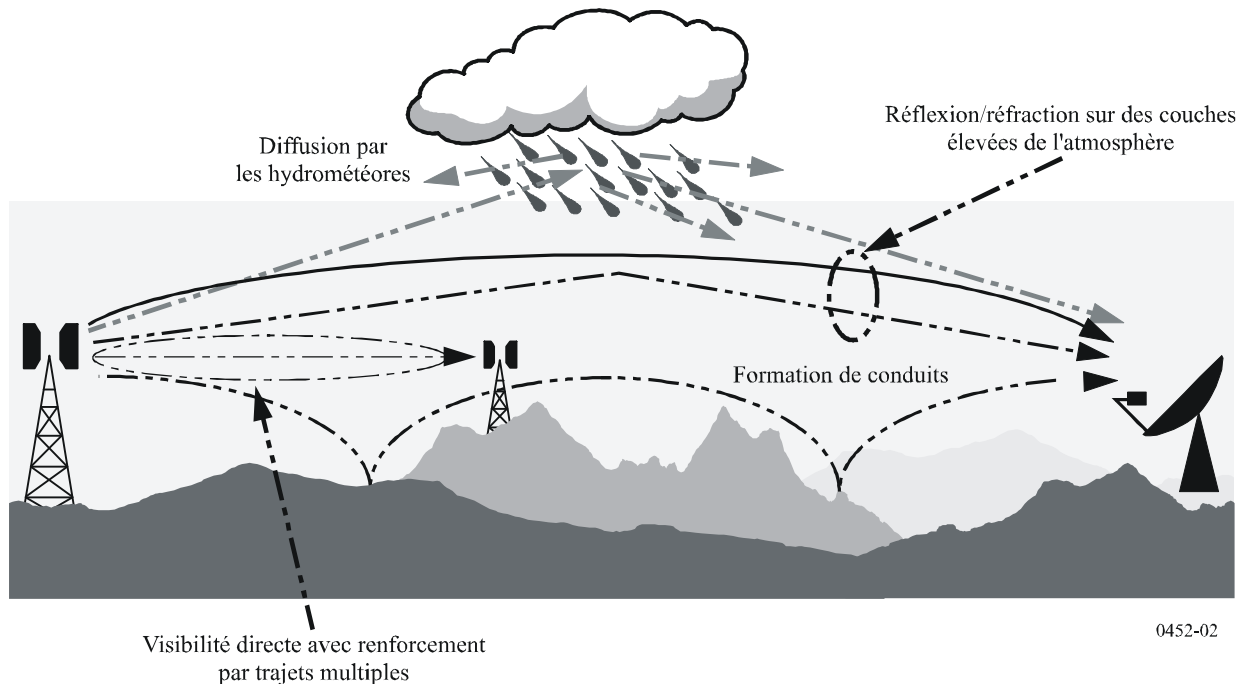
- *Diffusion troposphérique* (Fig. 1): Ce mécanisme définit le niveau de brouillage ambiant pour de longs trajets (par exemple, plus de 100-150 km), sur lesquels le champ de diffraction devient très faible. Cependant, sauf dans un petit nombre de cas particuliers mettant en jeu des stations terriennes 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.

FIGURE 2

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



0452-02

- *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 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 constituent pas en général un problème important.

L'une des difficultés principales dans la prévision des brouillages, difficulté 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 défini des méthodes entièrement séparées pour prévoir les brouillages par temps clair et les brouillages dus à la diffusion par les hydrométéores, décrits respectivement aux § 4 et 5.

La méthode par temps clair utilise des modèles séparés pour la diffraction, la propagation par conduits/réflexion sur des couches et la diffusion troposphérique. Ces trois modèles sont appliqués à chaque cas, quel que soit le trajet considéré (en LoS ou transhorizon). Les résultats sont ensuite combinés pour obtenir une prévision globale s'appuyant 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 soit le plus élevé possible.

3 Prédiction des brouillages par temps clair

3.1 Remarques générales

Bien que la méthode par temps clair soit mise en œuvre par chacun des trois modèles, dont les résultats sont ensuite mis en commun, la méthode de prédiction prend en compte cinq types principaux de mécanismes de propagation:

- *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).

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 prédiction pour une année moyenne ou pour le mois le plus défavorable

Le choix entre une prédiction pour l'année ou pour le «mois le plus défavorable» est généralement dicté par les objectifs de qualité (qualité de fonctionnement, disponibilité) du système radioélectrique 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. 11 et 12 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. 13 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:

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

où:

d_{tm} : 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_{tm} 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 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 A1 «côtière» 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 (IDWM). Cette carte, qui est disponible auprès du BR, 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 équivalent 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 :

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

Le rayon terrestre équivalent dépassé pendant $\beta_0\%$ du temps, a_β , a pour expression:

$$a_\beta = 6371 \cdot k_\beta \quad \text{km} \quad (6b)$$

où $k_\beta = 3,0$ est une estimation du facteur multiplicatif du rayon terrestre équivalent dépassé pendant $\beta_0\%$ du temps.

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 (6a). Les informations sur la manière d'obtenir, de construire et d'analyser le profil du trajet sont données dans l'Appendice 2 à l'Annexe 1.

TABLEAU 3

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

Paramètre	Description
d	Longueur du trajet le long du grand cercle (km)
d_{lt}, d_{lr}	Pour un trajet transhorizon, distance entre les antennes d'émission et de réception et leur horizon respectif (km). Pour un trajet en visibilité directe, chacun de ces paramètres correspond à la distance entre la station et le point du profil identifié comme constituant l'arête principale dans le modèle de diffraction pendant 50% du temps.
θ_s, θ_r	Pour un trajet transhorizon, angles d'élévation de l'horizon à l'émission et à la réception (mrad). Pour un trajet en LoS, chacun de ces paramètres correspond à l'angle d'élévation de l'autre station.
θ	Distance angulaire du trajet (mrad)
h_{ts}, h_{rs}	Hauteur du centre des antennes au-dessus du niveau moyen de la mer (m)
h_{te}, h_{re}	Hauteurs équivalentes des antennes au-dessus du terrain (m) (voir les définitions dans l'Appendice 2)
d_b	Longueur cumulée des tronçons du trajet au-dessus d'étendues d'eau (km)
ω	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 (138). Pour les trajets en totalité terrestres: $\omega = 0$
$d_{ct, cr}$	Distance terrestre entre les antennes d'émission et de réception et la côte, le long du trajet de brouillage dans le plan du grand cercle (km). Cette distance est égale à zéro pour une station sur un navire ou une plate-forme en mer

4 Modèles de propagation par temps clair

L'affaiblissement de transmission de référence L_b (dB), non dépassé pendant le pourcentage de temps annuel requis, p , est évalué comme indiqué dans les paragraphes qui suivent.

4.1 Propagation en visibilité directe (comprenant les effets à court terme)

Il convient d'évaluer les paramètres suivants pour les trajets en LoS et transhorizons.

L'affaiblissement de transmission de référence dû à la propagation en espace libre et à l'absorption par les gaz atmosphériques:

$$L_{bfs_g} = 92,5 + 20 \log f + 20 \log d + A_g \quad \text{dB} \quad (8)$$

où:

A_g : absorption totale par les gaz (dB):

$$A_g = [\gamma_o + \gamma_w(\rho)] d \quad \text{dB} \quad (9)$$

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:

$$\rho = 7,5 + 2,5 \omega \quad \text{g/m}^3 \quad (9a)$$

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

Les corrections pour tenir compte des effets des trajets multiples et de la focalisation pendant les pourcentages de temps p et β_0 :

$$E_{sp} = 2,6 [1 - \exp(-0,1 \{d_{lt} + d_{lr}\})] \log (p/50) \quad \text{dB} \quad (10a)$$

$$E_{s\beta} = 2,6 [1 - \exp(-0,1 \{d_{lt} + d_{lr}\})] \log (\beta_0/50) \quad \text{dB} \quad (10b)$$

L'affaiblissement de transmission de référence non dépassé pendant un pourcentage de temps $p\%$, dû à la propagation en LoS:

$$L_{b0p} = L_{bfs_g} + E_{sp} \quad \text{dB} \quad (11)$$

L'affaiblissement de transmission de référence non dépassé pendant un pourcentage de temps β_0 , dû à la propagation en LoS:

$$L_{b0\beta} = L_{bfs_g} + E_{s\beta} \quad \text{dB} \quad (12)$$

4.2 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. En conséquence, l'affaiblissement dû à la diffraction non dépassé pour $p < \beta_0\%$ est censé être le même que pour $p < \beta_0\%$ du temps.

Le modèle de diffraction calcule les valeurs suivantes demandées au § 4.6:

- L_{dp} : affaiblissement dû à la diffraction non dépassé pendant $p\%$ du temps
- L_{bd50} : valeur médiane de l'affaiblissement de transmission de référence associé à la diffraction
- L_{bd} : affaiblissement de transmission de référence associé à la diffraction, non dépassé pendant $p\%$ du temps.

L'affaiblissement dû à la diffraction se calcule pour tous les trajets au moyen d'une méthode hybride associant la construction de Deygout et une correction empirique. Cette méthode permet d'évaluer l'affaiblissement dû à la diffraction pour tous les types de trajet, y compris les trajets au-dessus de la mer ou au-dessus des terres (intérieur des terres ou zones côtières), et indépendamment de la configuration du terrain (régulier ou irrégulier).

Il convient d'utiliser cette méthode, même si les arêtes identifiées par la construction Deygout sont des points de profil adjacents.

De plus, cette méthode fait largement usage d'une approximation de l'affaiblissement dû à la diffraction sur une seule arête en lame de couteau en fonction du paramètre sans dimension, v , donné par:

$$J(v) = 6,9 + 20 \log \left(\sqrt{(v-0,1)^2 + 1} + v - 0,1 \right) \quad (13)$$

Il est à noter que $J(-0,78) \approx 0$, ce qui définit la limite inférieure à laquelle il convient d'utiliser cette approximation. $J(v)$ est mis à zéro pour $v < -0,78$.

4.2.1 Valeur médiane de l'affaiblissement dû à la diffraction

La valeur médiane de l'affaiblissement dû à la diffraction, L_{d50} (dB), se calcule au moyen de la valeur médiane du rayon terrestre équivalent, a_e , donnée par l'équation (6a).

Valeur médiane de l'affaiblissement dû à la diffraction pour l'arête principale

On calcule une correction, ζ_m , pour la pente sur toute la longueur du trajet donnée par:

$$\zeta_m = \cos \left(\tan^{-1} \left(10^{-3} \frac{h_{rs} - h_{ts}}{d} \right) \right) \quad (14)$$

On détermine l'arête principale et on calcule son paramètre de diffraction, v_{m50} , donné par:

$$v_{m50} = \max_{i=1}^{n-1} \left(\zeta_m H_i \sqrt{\frac{2 \times 10^{-3} d}{\lambda d_i (d - d_i)}} \right) \quad (15)$$

où le dégagement vertical, H_i , est:

$$H_i = h_i + 10^3 \frac{d_i (d - d_i)}{2a_e} - \frac{h_{ts} (d - d_i) + h_{rs} \cdot d_i}{d} \quad (15a)$$

et

$h_{ts,rs}$: hauteurs des antennes d'émission et de réception au-dessus du niveau de la mer (m) (voir le Tableau 3)

λ : longueur d'onde (m) = $0,3/f$

f : fréquence (GHz)

d : longueur du trajet (km)

d_i : distance du i -ème point du profil par rapport à l'émetteur (km) (voir le § 3.2.1, étape 4)

h_i : hauteur du i -ème point du profil au-dessus du niveau de la mer (m) (voir le § 3.2.1, étape 4).

On met i_{m50} à la valeur de l'indice du point du profil avec pour valeur maximale, v_{m50} .

On calcule la valeur médiane de l'affaiblissement dû à la diffraction sur des arêtes en lame de couteau pour l'arête principale, L_{m50} , donnée par:

$$L_{m50} = \begin{cases} J(v_{m50}) & \text{si } v_{m50} \geq -0,78 \\ = 0 & \text{autrement} \end{cases} \quad (16)$$

Si $L_{m50} = 0$, la valeur médiane de l'affaiblissement dû à la diffraction, L_{d50} , et l'affaiblissement dû à la diffraction non dépassé pendant $\beta_0\%$ du temps, $L_{d\beta}$, sont tous deux égaux à zéro et il n'y a plus lieu de poursuivre les calculs de la diffraction.

Autrement, les éventuels affaiblissements supplémentaires dus à des arêtes secondaires aux extrémités d'émission et de réception de l'arête principale doivent être examinés, comme indiqué ci-dessous.

Valeur médiane de l'affaiblissement dû à la diffraction pour l'arête secondaire à l'extrémité d'émission

Si $i_{m50} = 1$, il n'y a pas d'arête secondaire à l'extrémité d'émission et l'affaiblissement dû à la diffraction associé, L_{t50} , doit être mis à zéro. Autrement, on poursuit le calcul comme indiqué ci-dessous. On calcule une correction, ζ_t , pour la pente du trajet entre l'émetteur et l'arête principale:

$$\zeta_t = \cos \left(\tan^{-1} \left(10^{-3} \frac{h_{im50} - h_{ts}}{d_{im50}} \right) \right) \quad (17)$$

On détermine l'arête secondaire à l'extrémité d'émission et on calcule son paramètre de diffraction, v_{t50} , donné par:

$$v_{t50} = \max_{i=1}^{i_{m50}-1} \left(\zeta_t H_i \sqrt{\frac{2 \times 10^{-3} d_{im50}}{\lambda d_i (d_{im50} - d_i)}} \right) \quad (18)$$

où:

$$H_i = h_i + 10^3 \frac{d_i (d_{im50} - d_i)}{2a_e} - \frac{h_{ts} (d_{im50} - d_i) + h_{im50} d_i}{d_{im50}} \quad (18a)$$

On met i_{t50} à la valeur de l'indice du point du profil correspondant à l'arête secondaire à l'extrémité d'émission (c'est-à-dire l'indice de l'une des diverses hauteurs du terrain correspondant à la valeur v_{t50}).

On calcule la valeur médiane de l'affaiblissement dû à la diffraction sur des arêtes en lame de couteau pour l'arête secondaire à l'extrémité d'émission, L_{t50} , donnée par:

$$L_{t50} = \begin{cases} J(v_{t50}) & \text{pour } v_{t50} \geq -0,78 \text{ et } i_{m50} > 2 \\ = 0 & \text{autrement} \end{cases} \quad (19)$$

Valeur médiane de l'affaiblissement dû à la diffraction pour l'arête secondaire à l'extrémité de réception

Si $i_{m50} = n-1$, il n'y a pas d'arête secondaire à l'extrémité de réception et l'affaiblissement dû à la diffraction associé, L_{r50} , doit être mis à zéro. Autrement, on poursuit le calcul comme indiqué ci-dessous. On calcule une correction, ζ_r , pour la pente du trajet entre l'arête principale et le récepteur:

$$\zeta_r = \cos \left(\tan^{-1} \left(10^{-3} \frac{h_{rs} - h_{im50}}{d - d_{im50}} \right) \right) \quad (20)$$

On détermine l'arête secondaire à l'extrémité de réception et on calcule son paramètre de diffraction, v_{r50} , donné par:

$$v_{r50} = \max_{i=i_{m50}+1}^{n-1} \left(\zeta_r H_i \sqrt{\frac{2 \times 10^{-3} (d - d_{i_{m50}})}{\lambda (d_i - d_{i_{m50}}) (d - d_i)}} \right) \quad (21)$$

où:

$$H_i = h_i + 10^3 \frac{(d_i - d_{i_{m50}}) (d - d_i)}{2a_e} - \frac{h_{i_{m50}} (d - d_i) + h_{rs} (d_i - d_{i_{m50}})}{d - d_{i_{m50}}} \quad (21a)$$

On met i_{r50} à la valeur de l'indice du point du profil correspondant à l'arête secondaire à l'extrémité de réception (c'est-à-dire l'indice de l'une des diverses hauteurs du terrain correspondant à la valeur v_{r50}).

On calcule la valeur médiane de l'affaiblissement dû à la diffraction sur des arêtes en lame de couteau pour l'arête secondaire à l'extrémité de réception, L_{r50} , donnée par:

$$\begin{aligned} L_{r50} &= J(v_{r50}) && \text{pour } v_{r50} \geq -0,78 \text{ et } i_{m50} < n-1 \\ &= 0 && \text{autrement} \end{aligned} \quad (22)$$

Combinaison des affaiblissements des différentes arêtes pour la valeur médiane de la courbure de la Terre

On calcule la valeur médiane de l'affaiblissement dû à la diffraction, L_{d50} , donnée par:

$$\begin{aligned} L_{d50} &= L_{m50} + \left(1 - e^{-\frac{L_{m50}}{6}} \right) (L_{t50} + L_{r50} + 10 + 0,04d) && \text{pour } v_{m50} > -0,78 \\ &= 0 && \text{autrement} \end{aligned} \quad (23)$$

Dans l'équation (23) L_{t50} sera égal à zéro si l'arête secondaire à l'extrémité d'émission n'existe pas et, de même, L_{r50} sera égal à zéro si l'arête secondaire à l'extrémité de réception n'existe pas.

Si $L_{d50} = 0$, alors l'affaiblissement dû à la diffraction non dépassé pendant $\beta_0\%$ du temps sera lui aussi égal à zéro.

Si la prévision n'est nécessaire que pour $p = 50\%$, il n'y a plus lieu de poursuivre les calculs de la diffraction (voir le § 4.2.3). Autrement, l'affaiblissement dû à la diffraction non dépassé pendant $\beta_0\%$ du temps doit être calculé comme indiqué ci-dessous.

4.2.2 Affaiblissement dû à la diffraction non dépassé pendant $\beta_0\%$ du temps

L'affaiblissement dû à la diffraction non dépassé pendant $\beta_0\%$ du temps se calcule au moyen du rayon terrestre équivalent dépassé pendant $\beta_0\%$ du temps, a_β , donné par l'équation (6b). Pour ce deuxième calcul de la diffraction, les arêtes obtenues pour le cas médian devraient être utilisées pour la construction de Deygout. On procédera comme indiqué ci-dessous pour calculer cet affaiblissement dû à la diffraction.

Affaiblissement dû à la diffraction pour l'arête principale non dépassé pendant $\beta_0\%$ du temps

On détermine le paramètre de diffraction pour l'arête principale, $v_{m\beta}$, donné par:

$$v_{m\beta} = \zeta_m H_{i_{m\beta}} \sqrt{\frac{2 \times 10^{-3} d}{\lambda d_{i_{m50}} (d - d_{i_{m50}})}} \quad (24)$$

où:

$$H_{im\beta} = h_{im50} + 10^3 \frac{d_{im50}(d - d_{im50})}{2a_\beta} - \frac{h_{ts}(d - d_{im50}) + h_{rs}d_{im50}}{d} \quad (24a)$$

On calcule l'affaiblissement dû à la diffraction sur des arêtes en lame de couteau pour l'arête principale, $L_{m\beta}$, donné par:

$$\begin{aligned} L_{m\beta} &= J(v_{m\beta}) && \text{pour } v_{m\beta} \geq -0,78 \\ &= 0 && \text{autrement} \end{aligned} \quad (25)$$

Affaiblissement dû à la diffraction pour l'arête secondaire à l'extrémité d'émission non dépassé pendant $\beta_0\%$ du temps

Si $L_{i50} = 0$, alors $L_{i\beta}$ sera égal à zéro. Autrement, on calcule le paramètre de diffraction pour l'arête secondaire à l'extrémité d'émission, $v_{i\beta}$, donné par:

$$v_{i\beta} = \zeta_t H_{i\beta} \sqrt{\frac{2 \times 10^{-3} d_{im50}}{\lambda d_{it50} (d_{im50} - d_{it50})}} \quad (26)$$

où:

$$H_{i\beta} = h_{it50} + 10^3 \frac{d_{it50}(d_{im50} - d_{it50})}{2a_\beta} - \frac{h_{ts}(d_{im50} - d_{it50}) + h_{im50}d_{it50}}{d_{im50}} \quad (26a)$$

On calcule l'affaiblissement dû à la diffraction sur des arêtes en lame de couteau pour l'arête secondaire à l'extrémité d'émission, $L_{i\beta}$, donné par:

$$\begin{aligned} L_{i\beta} &= J(v_{i\beta}) && \text{pour } v_{i\beta} \geq -0,78 \\ &= 0 && \text{autrement} \end{aligned} \quad (27)$$

Affaiblissement dû à la diffraction pour l'arête secondaire à l'extrémité de réception non dépassé pendant $\beta_0\%$ du temps

Si $L_{r50} = 0$, alors $L_{r\beta}$ sera égal à zéro. Autrement, on calcule le paramètre de diffraction pour l'arête secondaire à l'extrémité de réception, $v_{r\beta}$, donné par:

$$v_{r\beta} = \zeta_r H_{r\beta} \sqrt{\frac{2 \times 10^{-3} (d - d_{im50})}{\lambda (d_{ir50} - d_{im50})(d - d_{ir50})}} \quad (28)$$

où:

$$H_{r\beta} = h_{ir50} + 10^3 \frac{(d_{ir50} - d_{im50})(d - d_{ir50})}{2a_\beta} - \frac{h_{im50}(d - d_{ir50}) + h_{rs}(d - d_{im50})}{d - d_{im50}} \quad (28a)$$

On calcule l'affaiblissement dû à la diffraction sur des arêtes en lame de couteau pour l'arête secondaire à l'extrémité de réception, $L_{r\beta}$, donné par:

$$\begin{aligned} L_{r\beta} &= J(v_{r\beta}) && \text{pour } v_{r\beta} \geq -0,78 \\ &= 0 && \text{autrement} \end{aligned} \quad (29)$$

Combinaison des affaiblissements pour les différentes arêtes non dépassés pendant $\beta_0\%$ du temps

On calcule l'affaiblissement dû à la diffraction non dépassé pendant $\beta_0\%$ du temps, $L_{d\beta}$, donné par:

$$L_{d\beta} = L_{m\beta} + \left(1 - e^{-\frac{L_{m\beta}}{6}} \right) (L_{t\beta} + L_{r\beta} + 10 + 0,04d) \quad \text{pour } v_{m\beta} > -0,78 \quad (30)$$

$$= 0 \quad \text{autrement}$$

4.2.3 Affaiblissement dû à la diffraction non dépassé pendant $p\%$ du temps

L'application des deux valeurs possibles du facteur multiplicatif du rayon terrestre équivalent est contrôlée par une fonction d'interpolation, F_i , fondée sur une distribution log-normale de l'affaiblissement dû à la diffraction dans la plage $\beta_0\% < p < 50\%$, elle est donnée par:

$$F_i = 0 \quad p = 50\% \quad (31a)$$

$$= \frac{I\left(\frac{p}{100}\right)}{I\left(\frac{\beta_0}{100}\right)} \quad \text{pour } 50\% > p > \beta_0\% \quad (31b)$$

$$= 1 \quad \text{pour } \beta_0\% \geq p \quad (31c)$$

où $I(x)$ est la fonction de distribution normale cumulative inverse. L'Appendice 3 à l'Annexe 1 donne une approximation de $I(x)$, que l'on peut utiliser en toute confiance pour $x < 0,5$.

L'affaiblissement dû à la diffraction, L_{dp} , non dépassé pendant $p\%$ du temps est ainsi donné par:

$$L_{dp} = L_{d50} + F_i (L_{d\beta} - L_{d50}) \quad \text{dB} \quad (32)$$

où L_{d50} et $L_{d\beta}$ sont définis par les équations (23) et (30), respectivement, et F_i est défini par les équations (31a-31c), en fonction des valeurs de p et de β_0 .

La valeur médiane de l'affaiblissement de transmission de référence associé à la diffraction, L_{bd50} , est donnée par:

$$L_{bd50} = L_{bfs\beta} + L_{d50} \quad \text{dB} \quad (33)$$

où $L_{bfs\beta}$ est donné par l'équation (8).

L'affaiblissement de transmission de référence associé à la diffraction non dépassé pendant $p\%$ du temps est donné par:

$$L_{bd} = L_{b0p} + L_{dp} \quad \text{dB} \quad (34)$$

où L_{b0p} est donné par l'équation (11).

4.3 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} (dB), non dépassé pendant un pourcentage de temps p quelconque mais inférieur à 50%, est donné par:

$$L_{bs} = 190 + L_f + 20 \log d + 0,573 \theta - 0,15 N_0 + L_c + A_g - 10,1 [-\log (p/50)]^{0,7} \quad \text{dB} \quad (35)$$

où:

L_f : affaiblissement en fonction de la fréquence:

$$L_f = 25 \log f - 2,5 [\log (f/2)]^2 \quad \text{dB} \quad (35a)$$

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

$$L_c = 0,051 \cdot e^{0,055(G_t + G_r)} \quad \text{dB} \quad (35b)$$

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 (9), en adoptant $\rho = 3 \text{ g/m}^3$ pour toute la longueur du trajet.

4.4 Phénomène de conduit/réflexion sur les couches

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

$$L_{ba} = A_f + A_d(p) + A_g \quad \text{dB} \quad (36)$$

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:

$$A_f = 102,45 + 20 \log f + 20 \log (d_{lt} + d_{lr}) + A_{st} + A_{sr} + A_{ct} + A_{cr} \quad \text{dB} \quad (37)$$

A_{lf} correction empirique pour tenir compte de l'accroissement de l'affaiblissement avec la longueur d'onde dû à la propagation par conduits.

$$A_{lf}(f) = 45,375 - 137,0 \cdot f + 92,5 \cdot f^2 \quad \text{dB} \quad \text{si } f < 0,5 \text{ GHz} \quad (37a)$$

$$A_{lf}(f) = 0,0 \text{ dB} \quad \text{autrement}$$

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:

$$A_{st, sr} = \begin{cases} 20 \log \left[1 + 0,361 \theta''_{t,r} (f \cdot d_{lt,lr})^{1/2} \right] + 0,264 \theta''_{t,r} f^{1/3} & \text{dB} \quad \text{pour } \theta''_{t,r} > 0 \text{ mrad} \\ 0 & \text{dB} \quad \text{pour } \theta''_{t,r} \leq 0 \text{ mrad} \end{cases} \quad (38)$$

où:

$$\theta''_{t,r} = \theta_{t,r} - 0,1 d_{lt,lr} \quad \text{mrad} \quad (38a)$$

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:

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

$$d_{ct,cr} \leq d_{lt,lr} \quad (39)$$

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

$$A_{ct,cr} = 0 \quad \text{dB} \quad \text{dans tous les autres cas} \quad (39a)$$

Il convient de noter le domaine limité de conditions pour lequel l'équation (39) 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:

$$A_d(p) = \gamma_d \cdot \theta' + A(p) \quad \text{dB} \quad (40)$$

où:

γ_d : affaiblissement linéique:

$$\gamma_d = 5 \times 10^{-5} a_e f^{1/3} \quad \text{dB/mrad} \quad (41)$$

θ' : distance angulaire (corrigée, le cas échéant à l'aide de l'équation (42a)), pour permettre l'application du modèle d'effet d'écran du terrain de l'équation (38):

$$\theta' = \frac{10^3 d}{a_e} + \theta'_t + \theta'_r \quad \text{mrad} \quad (42)$$

$$\theta'_{t,r} = \begin{cases} \theta_{t,r} & \text{pour } \theta_{t,r} \leq 0,1 d_{lt,lr} \quad \text{mrad} \\ 0,1 d_{lt,lr} & \text{pour } \theta_{t,r} > 0,1 d_{lt,lr} \quad \text{mrad} \end{cases} \quad (42a)$$

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

$$A(p) = -12 + (1,2 + 3,7 \times 10^{-3} d) \log \left(\frac{p}{\beta} \right) + 12 \left(\frac{p}{\beta} \right)^\Gamma \quad \text{dB} \quad (43)$$

$$\Gamma = \frac{1,076}{(2,0058 - \log \beta)^{1,012}} \times e^{-\left(9,51 - 4,8 \log \beta + 0,198 (\log \beta)^2\right) \times 10^{-6} \cdot d^{1,13}} \quad (43a)$$

$$\beta = \beta_0 \cdot \mu_2 \cdot \mu_3 \quad \% \quad (44)$$

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

$$\mu_2 = \left[\frac{500}{a_e} \frac{d^2}{(\sqrt{h_{te}} + \sqrt{h_{re}})^2} \right]^\alpha \quad (45)$$

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

$$\alpha = -0,6 - \varepsilon \cdot 10^{-9} \cdot d^{3,1} \cdot \tau \quad (45a)$$

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:

$$\mu_3 = \begin{cases} 1 & \text{pour } h_m \leq 10 \text{ m} \\ \exp \left[-4,6 \times 10^{-5} (h_m - 10) (43 + 6 d_i) \right] & \text{pour } h_m > 10 \text{ m} \end{cases} \quad (46)$$

$$d_l = \min (d - d_t - d_{lr}, 40) \quad \text{km} \quad (46a)$$

A_g : absorption totale par les gaz, déterminée à l'aide des équations (9) et (9a).

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

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

4.5.1 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. Elle permet de prévoir un affaiblissement supplémentaire maximal de 20 dB à chaque extrémité du trajet, appliqué au moyen d'une fonction d'interpolation en S visant à éviter de surévaluer l'affaiblissement par effet d'écran. L'affaiblissement supplémentaire maximal est de 20 dB au-dessus de 0,9 GHz et baisse progressivement, aux fréquences inférieures, jusqu'à 5 dB à 0,16 GHz. Si on a des doutes sur la nature exacte de cet environnement, on ne prendra pas en compte cet affaiblissement supplémentaire. Lorsqu'on utilise une correction, il faut veiller à ne pas avoir d'affaiblissements importants dus à des groupes d'obstacles dans des zones urbaines composées de tours isolées séparées par des espaces plus aérés. Les affaiblissements dus à des groupes d'obstacles que l'on observe dans ces zones sont souvent faibles par rapport à ceux observés dans des centres-villes plus traditionnels où les bâtiments sont moins élevés mais plus compacts.

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.

4.5.2 Catégories de groupes d'obstacles

Le Tableau 4 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 4.

Les hauteurs et distances nominales données au Tableau 4 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.

4.5.3 Le modèle de gain de surélévation

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

$$A_h = 10,25 F_{fc} \cdot e^{-d_k} \left(1 - \tanh \left[6 \left(\frac{h}{h_a} - 0,625 \right) \right] \right) - 0,33 \quad \text{dB} \quad (47)$$

où:

$$F_{fc} = 0,25 + 0,375 \{ 1 + \tanh [7,5 (f - 0,5)] \} \quad (47a)$$

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

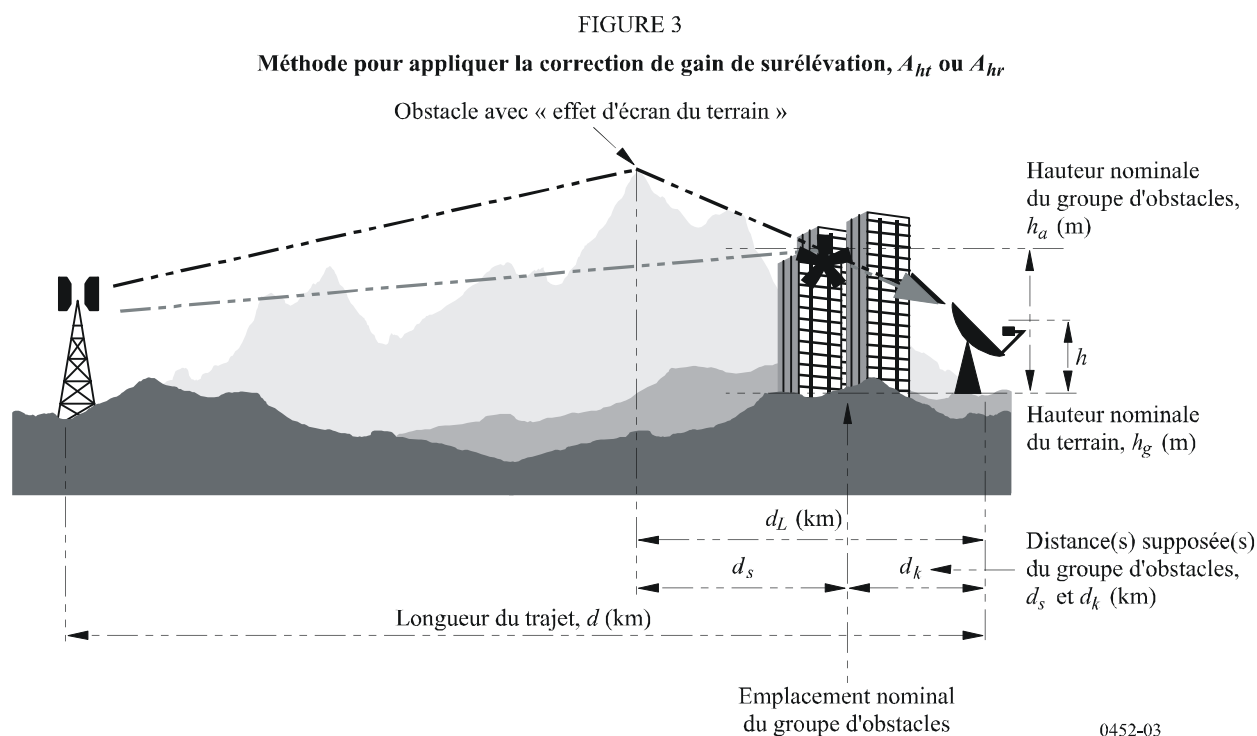
h_a : hauteur nominale du groupe d'obstacles (m) au-dessus du niveau du terrain local.

TABLEAU 4

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 urbaine (immeubles de grande hauteur)	35	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 4.



4.5.4 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 4). 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 (47), comme indiqué dans l'équation (54).

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 .

4.6 Prévision globale

Il convient d'appliquer la procédure suivante aux résultats des calculs précédents pour tous les trajets. On calcule un facteur d'interpolation, F_j , pour tenir compte de la distance angulaire du trajet:

$$F_j = 1,0 - 0,5 \left(1,0 + \operatorname{th} \left(3,0 \xi \frac{(\theta - \Theta)}{\Theta} \right) \right) \quad (48)$$

où:

$$\Theta = 0,3$$

$$\xi = 0,8$$

θ : distance angulaire du trajet (mrad) (définie dans le Tableau 7).

On calcule un facteur d'interpolation, F_k , pour tenir compte de la distance du trajet le long du grand cercle:

$$F_k = 1,0 - 0,5 \left(1,0 + \operatorname{th} \left(3,0 \kappa \frac{(d - d_{sw})}{d_{sw}} \right) \right) \quad (49)$$

où:

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

d_{sw} : paramètre constant déterminant la gamme des distances pour la technique associant les différents mécanismes de propagation blending (valeur fixée à 20)

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

On calcule une valeur minimale théorique pour l'affaiblissement de transmission de référence, L_{minb0p} (dB), associée à la propagation en LoS et à la diffraction par des obstacles situés sous le trajet au-dessus de la mer.

$$L_{minb0p} = \begin{cases} L_{b0p} + (1 - \omega)L_{dp} & \text{pour } p < \beta_0 \\ L_{bd50} + (L_{b0\beta} + (1 - \omega)L_{dp} - L_{bd50}) \cdot F_i & \text{pour } p \geq \beta_0 \end{cases} \quad \text{dB} \quad (50)$$

où:

L_{b0p} : valeur théorique de l'affaiblissement de transmission de référence en visibilité directe non dépassé pendant $p\%$ du temps, indiquée par l'équation (11)

$L_{b0\beta}$: valeur théorique de l'affaiblissement de transmission de référence en LoS non dépassé pendant $\beta\%$ du temps, donnée par l'équation (12)

L_{dp} : affaiblissement dû à la diffraction non dépassé pendant $p\%$ du temps, calculé selon la méthode indiquée dans le § 4.2.

On calcule une valeur minimale théorique pour l'affaiblissement de transmission de référence, L_{minbap} (dB), associée aux renforcements du signal dus aux trajets en LoS et transhorizons:

$$L_{minbap} = \eta \ln \left(\exp \left(\frac{L_{ba}}{\eta} \right) + \exp \left(\frac{L_{b0p}}{\eta} \right) \right) \quad \text{dB} \quad (51)$$

où:

L_{ba} : affaiblissement de transmission de référence dû à la propagation par conduits/réflexion sur des couches non dépassé pendant $p\%$ du temps, donné par l'équation (36)

L_{b0p} : valeur théorique de l'affaiblissement de transmission de référence sur le trajet en visibilité directe non dépassé pendant $p\%$ du temps, donnée par l'équation (11)

$$\eta = 2,5$$

On calcule une valeur théorique pour l'affaiblissement de transmission de référence, L_{bda} (dB), associé à la diffraction et aux renforcements du signal dus au trajet en LoS et à la propagation par conduits/réflexion sur des couches:

$$L_{bda} = \begin{cases} L_{bd} & \text{pour } L_{minbap} > L_{bd} \\ L_{minbap} + (L_{bd} - L_{minbap})F_k & \text{pour } L_{minbap} \leq L_{bd} \end{cases} \quad \text{dB} \quad (52)$$

où:

L_{bd} : affaiblissement de transmission de référence pour la diffraction non dépassé pendant $p\%$ du temps d'après l'équation (34)

F_k : facteur d'interpolation donné par l'équation (49) conformément aux valeurs de p et de β_0 .

On calcule une valeur modifiée de l'affaiblissement de transmission de référence, L_{bam} (dB), qui tient compte de la diffraction ainsi que des renforcements du signal dus au trajet en visibilité directe ou à la propagation par conduits/réflexion sur des couches:

$$L_{bam} = L_{bda} + (L_{minb0p} - L_{bda}) F_j \quad \text{dB} \quad (53)$$

On calcule l'affaiblissement de transmission de référence final non dépassé pendant $p\%$ du temps, L_b (dB), donné par:

$$L_b = -5 \log(10^{-0,2L_s} + 10^{-0,2L_{bam}}) + A_{ht} + A_{hr} \quad \text{dB} \quad (54)$$

où:

$A_{ht,hr}$: sont les affaiblissements supplémentaires visant à tenir compte de l'occultation par des groupes d'obstacles pour l'émetteur et le récepteur. Ces valeurs devraient être mises à zéro en l'absence d'une telle occultation.

4.7 Calcul de l'affaiblissement de transmission

La méthode décrite aux § 4.1 à 4.6 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 l'angle δ formé par les droites passant par le centre de la Terre et chacune des deux stations, en utilisant la formule suivante:

$$\delta = \arccos(\sin(\varphi_t) \sin(\varphi_r) + \cos(\varphi_t) \cos(\varphi_r) \cos(\psi_t - \psi_r)) \quad \text{rad} \quad (55)$$

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

$$d = 6371 \cdot \delta \quad \text{km} \quad (56)$$

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:

$$\alpha_{tr} = \arccos(\{\sin(\varphi_r) - \sin(\varphi_t) \cos(\delta)\} / \sin(\delta) \cos(\varphi_t)) \quad \text{rad} \quad (57)$$

Après avoir appliqué l'expression (57), si $\psi_t - \psi_r > 0$; alors:

$$\alpha_{tr} = 2\pi - \alpha_{tr} \quad \text{rad} \quad (58)$$

On calcule l'angle azimutal de la station r à la station t , α_{rt} , par symétrie à partir des équations (57) et (58).

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 :

$$\varepsilon_{pt} = \frac{h_r - h_t}{d} - \frac{d}{2a_e} \quad \text{rad} \quad (59a)$$

et

$$\varepsilon_{pr} = \frac{h_t - h_r}{d} - \frac{d}{2a_e} \quad \text{rad} \quad (59b)$$

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:

$$\varepsilon_{pt} = \frac{\theta_t}{1000} \quad \text{rad} \quad (60a)$$

et

$$\varepsilon_{pr} = \frac{\theta_r}{1000} \quad \text{rad} \quad (60b)$$

A noter que les angles par rapport à l'horizon radioélectrique, θ_t et θ_r (mrad), apparaissent pour la première fois dans le Tableau 3 et sont définis respectivement aux § 5.1.1 et § 5.1.3 de l'Appendice 1 à l'Annexe 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:

$$\chi_t = \arccos(\cos(\varepsilon_t) \cos(\varepsilon_{pt}) \cos(\alpha_{tr} - \alpha_t) + \sin(\varepsilon_t) \sin(\varepsilon_{pt})) \quad (61a)$$

et

$$\chi_r = \arccos(\cos(\varepsilon_r) \cos(\varepsilon_{pr}) \cos(\alpha_{rt} - \alpha_r) + \sin(\varepsilon_r) \sin(\varepsilon_{pr})) \quad (61b)$$

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:

$$L = L_b(p) - G_t - G_r \quad \text{dB} \quad (62)$$

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 Prévision des brouillages dus à la diffusion par les hydrométéores

Contrairement aux méthodes précédentes de prévision des brouillages par temps clair décrites ci-dessus, la méthode de prévision des brouillages dus à la diffusion par les hydrométéores (décrite ci-après) utilise des expressions pour l'affaiblissement de transmission entre deux stations directement étant donné qu'elle suppose que les diagrammes de rayonnement de la station brouilleuse et de la station brouillée soient connus.

Cette méthode est assez générale en ce sens qu'elle peut être utilisée avec n'importe quel diagramme de rayonnement d'antenne permettant de déterminer le gain de l'antenne pour tout angle par rapport à l'axe de visée. Les diagrammes de rayonnement des Recommandations UIT-R P.620, UIT-R F.699, UIT-R F.1245, UIT-R S.465 et UIT-R S.580, par exemple, peuvent tous être utilisés, tout comme des diagrammes plus complexes basés sur des fonctions de Bessel ou des diagrammes réels mesurés, s'ils sont disponibles. Cette méthode peut également être utilisée avec des antennes équidirectives ou des antennes sectorielles, comme celles dont les caractéristiques sont données dans la Recommandation UIT-R F.1336, antennes dont le gain est en général déterminé à partir de l'angle vertical par rapport à l'axe de visée (c'est-à-dire l'élévation par rapport à l'angle de gain maximal).

La méthode est générale aussi en raison du fait qu'elle n'est pas limitée à une géométrie particulière si l'on dispose de diagrammes de rayonnement d'antenne avec une couverture de $\pm 180^\circ$. Sont ainsi couverts le couplage faisceau principal-faisceau principal ainsi que le couplage lobe latéral-faisceau principal et les géométries de diffusion sur le grand cercle et de diffusion latérale. Cette méthode permet de calculer les niveaux de brouillage à la fois pour de longs trajets (> 100 km) et pour des trajets plus courts (quelques kilomètres seulement), les angles d'élévation et d'azimut mesurés au niveau de l'une ou l'autre station étant choisis arbitrairement. Cette méthode est donc toute indiquée pour toute une série de scénarios et de services, notamment pour déterminer le brouillage dû à la diffusion par la pluie entre deux stations de Terre, entre une station de Terre et une station terrienne et entre deux stations terriennes exploitées dans des bandes de fréquences attribuées dans les deux sens de transmission.

Le BR dispose d'une mise en œuvre du modèle en FORTRAN, modèle qui utilise les diagrammes de rayonnement d'antenne des Recommandations UIT-R P.620, UIT-R F.1245 et UIT-R F.1336.

5.1 Introduction

La méthode utilise l'équation d'un radar bistatique dans laquelle la puissance P_r , mesurée au niveau d'une station de réception et due à la diffusion par la pluie est exprimée en fonction de la puissance P_t rayonnée par une station d'émission:

$$P_r = P_t \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \iiint_{all\ space} \frac{G_t G_r \eta A}{r_t^2 r_r^2} dV \quad \text{W} \quad (63)$$

où:

- λ : longueur d'onde
- G_t : gain (linéaire) de l'antenne d'émission
- G_r : gain (linéaire) de l'antenne de réception
- η : section efficace de diffusion par unité de volume δV (m^2/m^3)
- A : affaiblissement le long du trajet entre l'émetteur et le récepteur (en termes linéaires)
- r_t : distance entre l'émetteur et l'élément volume de diffusion
- r_r : distance entre l'élément volume de diffusion et le récepteur.

Exprimée sous forme de l'affaiblissement de transmission (dB), pour la diffusion entre deux stations (Station 1 et Station 2), l'équation du radar bistatique devient:

$$L = 208 - 20 \log f - 10 \log Z_R - 10 \log C + 10 \log S + A_g - M \quad \text{dB} \quad (64)$$

où:

- f : fréquence (GHz)
- Z_R : réflectivité du radar au sol, qui peut être exprimée sous forme du taux de précipitation, R (mm/h):

$$Z_R = 400R^{1,4} \quad (65)$$

$10 \log S$: correction (dB), à apporter pour tenir compte de l'écart par rapport à la diffusion de Rayleigh, aux fréquences au-dessus de 10 GHz:

$$10 \log S = \begin{cases} R^{0,4} \cdot 10^{-3} \left[4(f-10)^{1,6} \left(\frac{1+\cos\varphi_S}{2} \right) + 5(f-10)^{1,7} \left(\frac{1-\cos\varphi_S}{2} \right) \right] & \text{pour } f > 10 \text{ GHz} \\ 0 & \text{pour } f \leq 10 \text{ GHz} \end{cases} \quad (66)$$

où:

- φ_S : angle de diffusion
- A_g : affaiblissement dû aux gaz atmosphériques le long du trajet entre l'émetteur et le récepteur (dB), calculé à partir de la Recommandation UIT-R P.676 (Annexe 2)
- M : désadaptation de polarisation entre l'émetteur et le récepteur (dB).

Dans le modèle considéré, la diffusion est limitée à la diffusion dans une cellule de pluie, laquelle a, par définition, une section efficace, circulaire, dont le diamètre dépend du taux de précipitation:

$$d_c = 3,3R^{-0,08} \quad \text{km} \quad (67)$$

Dans la cellule de pluie, le taux de précipitation et, par voie de conséquence, la réflectivité du radar sont supposés être constants jusqu'à la hauteur de pluie h_R . Au-dessus de cette hauteur de pluie, la réflectivité est supposée décroître de façon linéaire en fonction de la hauteur à une cadence de $-6,5$ dB/km.

La fonction de transfert de diffusion, C , est alors l'intégrale de volume sur la cellule de pluie et peut s'écrire en coordonnées cylindriques comme suit:

$$C = \int_0^{h_{max}} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{d_c}{2}} \frac{G_1 G_2}{r_1^2 r_2^2} A \zeta \cdot r \, dr d\phi dh \quad (68)$$

où:

- G_1, G_2 : gains linéaires, respectivement de la Station 1 et de la Station 2
- r_1, r_2 : distances (km), entre l'élément d'intégration δV et, respectivement, la Station 1 et la Station 2
- A : affaiblissement dû à la pluie, à l'intérieur et à l'extérieur de la cellule de pluie, exprimé en termes linéaires
- ζ : corrélation entre la hauteur et la réflectivité du radar:

$$\zeta = \begin{cases} 1 & \text{pour } h \leq h_R \\ 10^{-0,65(h-h_R)} & \text{pour } h > h_R \end{cases} \quad (69)$$

h_R : hauteur de pluie, (km)

r, ϕ, h : variables d'intégration dans la cellule de pluie.

L'intégration est réalisée numériquement, en coordonnées cylindriques. Toutefois, il est commode au départ d'utiliser, pour la géométrie de la diffusion depuis la station d'émission jusqu'à la station de réception en passant par une cellule de pluie, un système de coordonnées cartésiennes, la Station 1 étant prise comme point d'origine étant donné que la position effective de la cellule de pluie ne sera pas définie immédiatement, en particulier dans le cas d'une diffusion latérale.

Avec un système de coordonnées cartésiennes pour référence, il vaut mieux, dans un souci de simplicité, convertir les divers paramètres géométriques et passer des valeurs tenant compte de la courbure de la Terre aux valeurs pour une représentation plane.

L'existence du couplage faisceau principal-faisceau principal entre les antennes est établie à partir de la géométrie et la cellule de pluie est ensuite située au point d'intersection entre les axes des faisceaux principaux. S'il n'y a pas de couplage faisceau principal-faisceau principal, la cellule de pluie est située le long de l'axe du faisceau principal de la Station 1, centrée sur le point de rapprochement maximal de l'axe du faisceau principal de la Station 2. En l'occurrence, il convient de déterminer les affaiblissements de transmission pour un second cas, en interchangeant les paramètres de chaque station, la distribution des affaiblissements pour le cas le plus défavorable étant supposée être représentative des niveaux probables de brouillage.

5.2 Paramètres d'entrée

Le Tableau 5 donne la liste de tous les paramètres d'entrée dont on a besoin pour mettre en œuvre la méthode permettant de calculer la distribution cumulative de l'affaiblissement de transmission entre deux stations dû à la diffusion par la pluie.

TABLEAU 5

Liste des paramètres d'entrée

(Le suffixe 1 renvoie aux paramètres pour la Station 1 et le suffixe 2 aux paramètres pour la Station 2)

Paramètre	Unité	Description
d	km	Distance entre les stations
f	GHz	Fréquence
h_{1_loc}, h_{2_loc}	km	Hauteur de la Station 1 et hauteur de la Station 2 au-dessus du niveau moyen de la mer (valeur locale)
G_{max-1}, G_{max-2}	dB	Gain maximal pour chaque antenne
$h_R(p_h)$	km	Distribution cumulative de la hauteur de pluie dépassée exprimée sous forme d'un pourcentage de temps p_h (voir la Note 1)
M	dB	Désadaptation de polarisation entre les systèmes
P	hPa	Pression à la surface (valeur par défaut 1013,25 hPa)
$R(p_R)$	mm/h	Distribution cumulative du taux de précipitation dépassé exprimée sous forme d'un pourcentage de temps p_R
T	°C	Température à la surface (valeur par défaut 15° C)
$\alpha_{1_loc}, \alpha_{2_loc}$	rad	Azimut géographique de la Station 1 vers la Station 2 et azimuth géographique de la Station 2 vers la Station 1, dans le sens des aiguilles d'une montre
$\epsilon_{H1_loc}, \epsilon_{H2_loc}$	rad	Angles de site de l'horizon local pour la Station 1 et pour la Station 2
ρ	g/m ³	Densité de vapeur d'eau à la surface (valeur par défaut 8 g/m ³)
τ	degrés	Angle de polarisation de la liaison (0° pour la polarisation horizontale, 90° pour la polarisation verticale)

NOTE 1 – Si la distribution n'est pas disponible, utiliser la valeur médiane de la hauteur de pluie, h_R et le Tableau 6.

5.3 La procédure, étape par étape

Etape 1: Détermination des paramètres météorologiques

Pour calculer la distribution cumulative de l'affaiblissement de transmission dû à la diffusion par la pluie, sous forme du pourcentage de temps pendant lequel ces affaiblissements sont dépassés, on a besoin d'un certain nombre de paramètres d'entrée, à savoir les distributions de probabilité du taux de précipitation et la hauteur de pluie. Si elles sont disponibles, il faut utiliser les valeurs locales. Si tel n'est pas le cas, on peut se reporter à la Recommandation UIT-R P.837 pour obtenir les distributions cumulatives du taux de précipitation pour un emplacement quelconque, et à la Recommandation UIT-R P.839 pour avoir les valeurs médianes de la hauteur de pluie. Par défaut, pour la distribution cumulative des hauteurs de pluie, on peut utiliser la distribution de la hauteur de pluie par rapport à la valeur médiane (voir le Tableau 6).

Les distributions cumulatives du taux de précipitation et de la hauteur de pluie sont converties en fonctions de la densité de probabilité de la façon suivante. Pour chaque intervalle entre deux valeurs adjacentes du taux de précipitation ou de la hauteur de pluie, on considère que la valeur moyenne est représentative pour cet intervalle et sa probabilité d'occurrence est égale à la différence entre les deux probabilités de dépassement correspondantes. Les valeurs pour lesquelles la hauteur h_R est inférieure à 0 km (lorsqu'on utilise le Tableau 5) sont mises à 0 km et leurs probabilités sont additionnées.

TABLEAU 6

Distribution cumulative de la hauteur de pluie par rapport à sa valeur médiane

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

On suppose que le taux de précipitation et la hauteur de pluie sont des paramètres qui, statistiquement, sont indépendants l'un de l'autre, de sorte que la probabilité d'occurrence pour une combinaison donnée taux de précipitation/hauteur de pluie est simplement le produit des différentes probabilités.

Pour chaque paire de valeurs du taux de précipitation et de la hauteur de pluie, on calcule comme suit l'affaiblissement de transmission.

Etape 2: Conversion des paramètres géométriques pour une représentation plane

La géométrie de la diffusion par la pluie entre deux stations est déterminée à partir des paramètres d'entrée fondamentaux que sont la distance d entre les deux stations le long du grand cercle, les valeurs locales de l'angle d'élévation de l'antenne de chaque station, ε_{1-loc} et ε_{2-loc} , et les valeurs du décalage en azimut entre l'axe du faisceau principal de l'antenne pour chaque station et la direction de l'autre station, défini comme étant positif dans le sens des aiguilles d'une montre, α_{1-loc} et α_{2-loc} . La Station 1 est la position de référence, c'est-à-dire l'origine dans le système de coordonnées cartésiennes et les paramètres de référence sont donc les suivants:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{1-loc}, \alpha_1 = \alpha_{1-loc} \text{ et } \varepsilon_{H1} = \varepsilon_{H1-loc} \quad \text{rad} \quad (70)$$

Premièrement, on convertit tous les paramètres géométriques dans un système commun de coordonnées cartésiennes, la Station 1 étant l'origine, le plan horizontal étant le plan $x-y$, l'axe des x pointant dans la direction de la Station 2 et l'axe des z pointant verticalement vers le haut. La Fig. 4 illustre la géométrie sur la Terre courbe (dans le cas simplifié d'une diffusion vers l'avant, c'est-à-dire le long du grand cercle) où r_{eff} est le rayon équivalent de la Terre,

$$r_{eff} = k_{50} R_E \quad \text{km} \quad (71)$$

où:

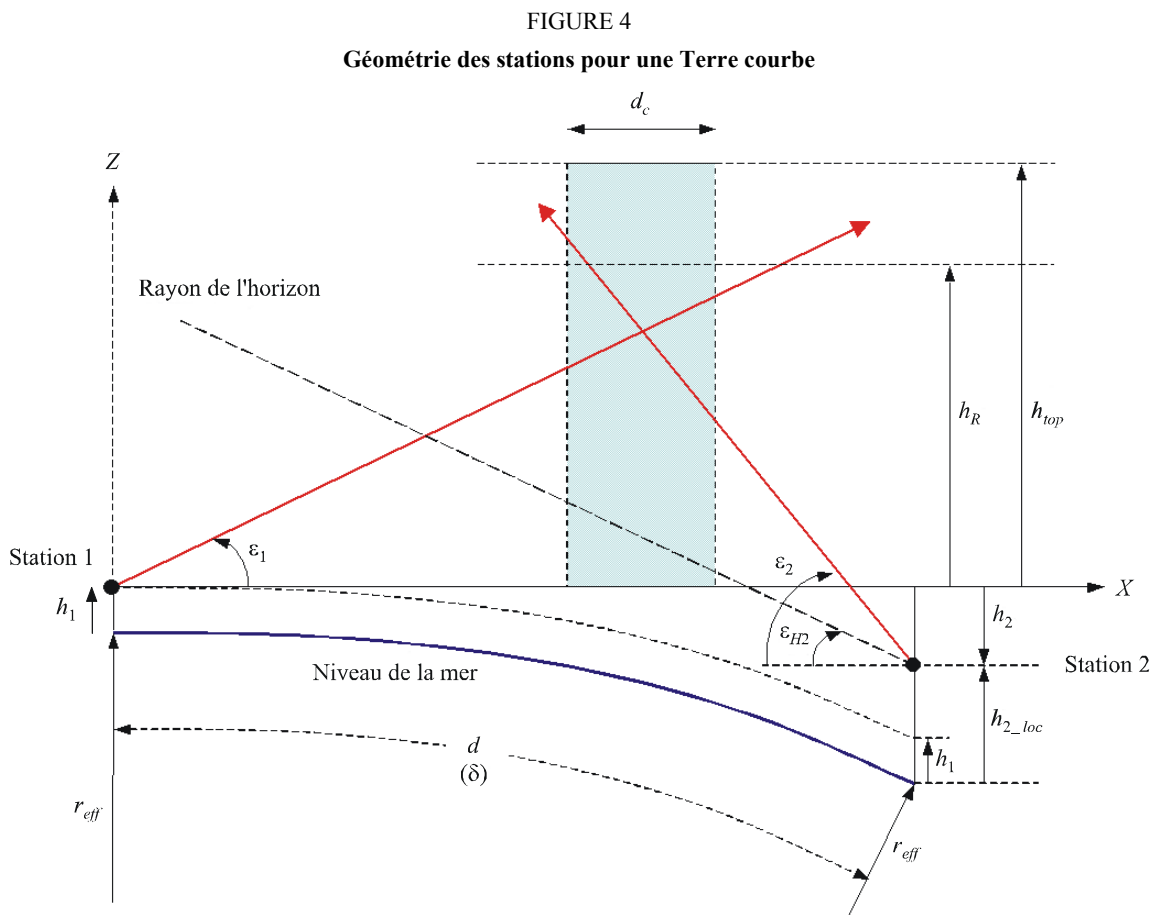
k_{50} : valeur médiane du facteur de multiplication du rayon équivalent de la Terre = 1,33

R_E : rayon réel de la Terre = 6 371 km.

Les deux stations sont séparées par la distance le long du grand cercle d (km), et δ est l'angle formé par les droites passant par le centre de la Terre et chacune des deux stations:

$$\delta = \frac{d}{r_{eff}} \quad \text{rad} \quad (72)$$

La verticale locale au niveau de la Station 2 est inclinée de l'angle δ par rapport à la verticale locale au niveau de la Station 1, c'est-à-dire l'axe des z . L'angle d'élévation et l'angle d'azimut de la Station 2 sont ensuite convertis pour une représentation plane comme suit, l'indice *loc* renvoyant aux valeurs locales.



On calcule l'angle d'élévation de la Station 2:

$$\epsilon_2 = \arcsin(\cos \epsilon_{2_loc} \cos \alpha_{2_loc} \sin \delta + \sin \epsilon_{2_loc} \cos \delta) \quad (73)$$

et l'angle de site de l'horizon au niveau de la Station 2:

$$\varepsilon_{H2} = \arcsin(\cos\varepsilon_{H2_loc} \cos\alpha_{2_loc} \sin\delta + \sin\varepsilon_{H2_loc} \cos\delta) \quad (74)$$

Le décalage en azimut de la Station 2 par rapport à la Station 1 est:

$$\alpha_2 = \arctg\left(\frac{\cos\varepsilon_{2_loc} \sin\alpha_{2_loc}}{\cos\varepsilon_{2_loc} \cos\alpha_{2_loc} \cos\delta - \sin\varepsilon_{2_loc} \sin\delta}\right) \quad (75)$$

et la hauteur de la Station 2 au-dessus du plan de référence est donnée par:

$$h_2 = h_{2_loc} - h_1 - d \frac{\delta}{2} \quad \text{km} \quad (76)$$

La différence en azimut entre les deux stations, au point d'intersection entre les projections au sol des axes des faisceaux principaux est:

$$\alpha_S = \pi - (\alpha_1 - \alpha_2) \quad \text{rad} \quad (77)$$

Etape 3: Détermination de la géométrie des liaisons

La méthode permettant de déterminer la géométrie des liaisons subissant le phénomène de diffusion utilise une notation vectorielle dans laquelle un vecteur dans un espace à trois dimensions est représenté par une matrice à une seule colonne à trois éléments comprenant les longueurs des projections de la droite considérée sur les axes x , y et z d'un système de coordonnées cartésiennes. Un vecteur sera représenté par un symbole en caractère gras. Ainsi, la valeur d'un vecteur peut en général s'écrire comme suit:

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

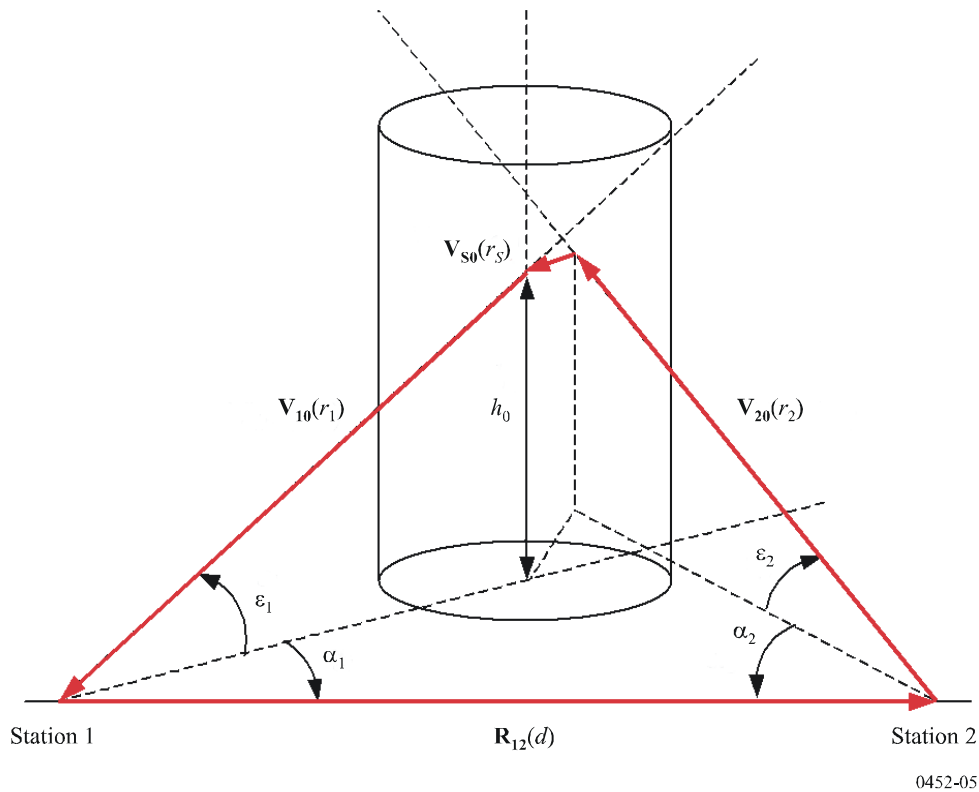
Un vecteur unité de longueur sera, en règle générale, représenté par le symbole \mathbf{V} , alors qu'un vecteur général (par exemple, de grandeur) sera représenté par un autre symbole approprié, par exemple \mathbf{R} .

La géométrie de base de la diffusion par la pluie est illustrée de façon schématique sur la Fig. 5 dans le cas général de la diffusion latérale où les deux axes des faisceaux principaux en fait ne se coupent pas. En d'autres termes, cet exemple correspond au couplage lobe latéral-lobe principal. Le trajet de brouillage peut être celui allant des lobes latéraux de la Station 2 au lobe principal de la Station 1 ou vice versa.

FIGURE 5

Schéma de la géométrie de la diffusion par la pluie dans le cas général de la diffusion latérale

A noter que les faisceaux des antennes ne coïncident pas dans cet exemple et que «l'angle de divergence» n'est pas égal à zéro. Voir les équations (79) et (80)



Le centre de la cellule de pluie est situé le long de l'axe du faisceau principal de l'antenne de la Station 1 au point de rapprochement maximal entre les deux faisceaux d'antenne. La géométrie est établie en notation vectorielle comme suit.

Le vecteur depuis la Station 1 jusqu'à la Station 2 est défini comme suit:

$$\mathbf{R}_{12} = \begin{bmatrix} d \\ 0 \\ h_2 \end{bmatrix} \quad \text{km} \quad (78)$$

Les vecteurs \mathbf{R}_{12} , $r_2 \mathbf{V}_{20}$, $r_S \mathbf{V}_{S0}$ et $r_1 \mathbf{V}_{10}$ forment un polygone à trois dimensions fermé, le vecteur \mathbf{V}_{S0} étant perpendiculaire aux vecteurs \mathbf{V}_{10} et \mathbf{V}_{20} . Dans l'exemple illustré sur la Fig. 5, le vecteur \mathbf{V}_{S0} n'est pas dans le plan de la page.

Compte tenu de la courbure de la Terre, on calcule le vecteur unité de longueur \mathbf{V}_{10} dans la direction du faisceau principal de l'antenne de la Station 1:

$$\mathbf{V}_{10} = \begin{bmatrix} \cos \epsilon_1 \cos \alpha_1 \\ -\cos \epsilon_1 \sin \alpha_1 \\ \sin \epsilon_1 \end{bmatrix} \quad (79)$$

et le vecteur unité de longueur \mathbf{V}_{20} dans la direction du faisceau principal de l'antenne de la Station 2:

$$\mathbf{V}_{20} = \begin{bmatrix} \sin \varepsilon_{2_loc} \sin \delta - \cos \varepsilon_{2_loc} \cos \alpha_{2_loc} \cos \delta \\ \cos \varepsilon_{2_loc} \sin \alpha_{2_loc} \\ \sin \varepsilon_{2_loc} \cos \delta + \cos \varepsilon_{2_loc} \cos \alpha_{2_loc} \sin \delta \end{bmatrix} \quad (80)$$

La méthode utilise le produit scalaire des deux vecteurs qui s'écrit et est évalué comme suit:

$$\mathbf{V}_1 \cdot \mathbf{V}_2 = x_1 x_2 + y_1 y_2 + z_1 z_2 \quad \text{où } \mathbf{V}_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix}$$

L'angle de diffusion φ_S , c'est-à-dire l'angle entre les deux faisceaux d'antenne, est déterminé à partir du produit scalaire des deux vecteurs \mathbf{V}_{10} et \mathbf{V}_{20} :

$$\varphi_S = \arccos(-\mathbf{V}_{20} \cdot \mathbf{V}_{10}) \quad (81)$$

Si $\varphi_S < 0,001$ rad, alors les deux faisceaux d'antenne sont approximativement parallèles et on peut supposer que le couplage lié à la diffusion par la pluie sera négligeable.

Comme indiqué sur la Fig. 5, les quatre vecteurs \mathbf{R}_{12} , $r_2 \mathbf{V}_{20}$, $r_S \mathbf{V}_{S0}$ et $r_1 \mathbf{V}_{10}$ forment un polygone fermé à trois dimensions, c'est-à-dire:

$$\mathbf{R}_{12} + r_2 \mathbf{V}_{20} + r_S \mathbf{V}_{S0} - r_1 \mathbf{V}_{10} = 0 \quad (82)$$

cette équation peut être résolue pour les distances r_i . La méthode utilise le produit vectoriel des deux vecteurs qui s'écrit et est évalué comme suit. Le produit vectoriel est égal à:

$$\mathbf{V}_1 \times \mathbf{V}_2 = \begin{bmatrix} y_1 z_2 - z_1 y_2 \\ z_1 x_2 - x_1 z_2 \\ x_1 y_2 - y_1 x_2 \end{bmatrix}$$

Le vecteur unité de longueur \mathbf{V}_{S0} , qui est perpendiculaire aux deux faisceaux d'antenne, est calculé à partir du produit vectoriel $\mathbf{V}_{20} \times \mathbf{V}_{10}$:

$$\mathbf{V}_{S0} = \frac{\mathbf{V}_{20} \times \mathbf{V}_{10}}{\sin \varphi_S} \quad (83)$$

L'équation (82) peut être résolue en utilisant le déterminant des trois vecteurs qui s'écrit et est évalué comme suit:

$$\det[\mathbf{V}_1 \quad \mathbf{V}_2 \quad \mathbf{V}_3] = \det \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ z_1 & z_2 & z_3 \end{bmatrix} = x_1(y_2 z_3 - y_3 z_2) + x_2(y_3 z_1 - y_1 z_3) + x_3(y_1 z_2 - y_2 z_1)$$

On calcule la distance entre les deux faisceaux au point de rapprochement maximal:

$$r_S = \frac{\det[\mathbf{V}_{10} \quad \mathbf{V}_{20} \quad \mathbf{V}_{12}]}{\det[\mathbf{V}_{10} \quad \mathbf{V}_{20} \quad \mathbf{V}_{S0}]} \quad (84)$$

La distance sur le trajet oblique r_1 entre la Station 1 le long de son faisceau principal et le point de rapprochement maximal du faisceau principal de la Station 2 est:

$$r_1 = \frac{\det[\mathbf{V}_{12} \quad \mathbf{V}_{20} \quad \mathbf{V}_{S0}]}{\det[\mathbf{V}_{10} \quad \mathbf{V}_{20} \quad \mathbf{V}_{S0}]} \quad (85)$$

alors que la distance correspondante sur le trajet oblique r_2 entre la Station 2 le long de son faisceau principal et le point de rapprochement maximal du faisceau principal de la Station 1 est:

$$r_2 = \frac{-\det[\mathbf{V}_{10} \quad \mathbf{V}_{12} \quad \mathbf{V}_{S0}]}{\det[\mathbf{V}_{10} \quad \mathbf{V}_{20} \quad \mathbf{V}_{S0}]} \quad (86)$$

On calcule «l'angle de divergence» hors axe Ψ_1 au niveau de la Station 1 au point de rapprochement maximal de l'axe du faisceau principal de la Station 2:

$$\Psi_1 = \arctg\left(\frac{|r_S|}{r_1}\right) \quad (87)$$

et «l'angle de divergence» hors axe correspondant au niveau de la Station 1 au point de rapprochement maximal de l'axe du faisceau principal de la Station 1:

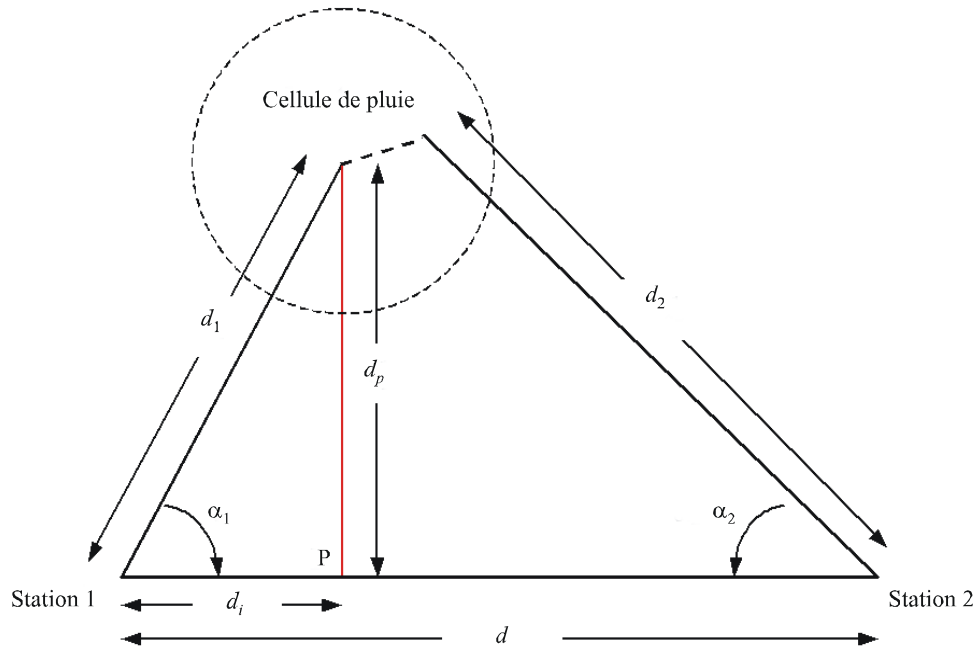
$$\Psi_2 = \arctg\left(\frac{|r_S|}{r_2}\right) \quad (88)$$

A partir de ces paramètres, on détermine s'il y a ou non couplage faisceau principal-faisceau principal entre les deux stations. Pour qu'il y ait couplage faisceau principal-faisceau principal, l'angle de divergence devrait être inférieur à l'ouverture de faisceau à 3 dB de l'antenne considérée. Pour des angles de divergence plus grands, il y aura en fait peu de couplage faisceau principal-faisceau principal, voire aucun, et le trajet de transmission sera affecté essentiellement par le couplage lobe latéral-faisceau principal. Dans ce cas, deux possibilités doivent être examinées, le centre de la cellule de pluie étant situé le long de l'axe du faisceau principal de chaque antenne, tour à tour, et l'affaiblissement de transmission le plus faible représentant la situation du cas le plus défavorable. Etant donné que l'emplacement par défaut de la cellule de pluie correspond au point de rapprochement maximal de l'axe du faisceau principal de la Station 1, on peut remplacer les paramètres de la Station 2 par ceux de la Station 1 et vice versa.

Enfin, il est nécessaire également de déterminer les projections horizontales des diverses distances calculées ci-dessus, à partir desquelles il sera possible d'établir l'emplacement de la cellule de pluie. La Fig. 6 montre la vue du plan pour le cas général de la diffusion latérale.

FIGURE 6

Vue du plan de la géométrie pour la diffusion latérale



Calculer la distance horizontale entre la Station 1 et le centre de la cellule de pluie, définie comme étant le point au sol situé immédiatement au-dessous du point de rapprochement maximal sur l'axe du faisceau principal de la Station 1:

$$d_1 = r_1 \cos \epsilon_1 \quad \text{km} \quad (89)$$

et la distance horizontale correspondante entre la Station 2 et la projection au sol de son point de rapprochement maximal:

$$d_2 = r_2 \cos \epsilon_2 \quad \text{km} \quad (90)$$

La hauteur au-dessus du sol du point de rapprochement maximal sur l'axe du faisceau principal de la Station 1 est:

$$h_0 = |r_1| \sin \epsilon_1 \quad \text{km} \quad (91)$$

alors que dans les cas où il n'y a pas de couplage faisceau principal-faisceau principal, la hauteur du point de rapprochement maximal sur l'axe du faisceau principal de la Station 2 est:

$$h_{2_0} = |r_2| \sin \epsilon_2 \quad \text{km} \quad (92)$$

Les paramètres de hauteur associés à la cellule de pluie doivent être corrigés pour tenir compte du décalage par rapport au trajet le long du grand cercle, dans le cas de la diffusion latérale. La distance, le long du grand cercle, entre les deux stations est:

$$d_p = d_1 \sin \alpha_1 \quad (93)$$

et l'espacement angulaire est alors:

$$\delta_p = \frac{d_p}{r_{eff}} \quad \text{km} \quad (94)$$

On détermine maintenant la correction à apporter pour la diffusion latérale:

$$h_c = h_1 + d_p \frac{\delta_p}{2} \quad \text{km} \quad (95)$$

A noter que cette correction doit également être apportée pour les autres paramètres associés à la cellule de pluie, c'est-à-dire la hauteur de pluie h_R et la limite supérieure d'intégration h_{top} , ainsi que pour la détermination de l'affaiblissement par les gaz (voir l'étape 8) qui nécessite l'utilisation de paramètres locaux.

Ainsi sont établis les principaux paramètres géométriques statiques à utiliser pour localiser la cellule de pluie par rapport aux stations et pour évaluer l'affaiblissement de transmission dû à la diffusion par la pluie. Il faut maintenant examiner la géométrie pour l'élément d'intégration qui peut se situer n'importe où dans la cellule de pluie, jusqu'à une limite supérieure d'intégration préalablement définie h_{top} afin de déterminer les gains d'antenne à chaque point dans la cellule de pluie ainsi que les affaiblissements sur le trajet dans la cellule de pluie, dans la direction de chacune des stations. Pour ce faire, on change de système de coordonnées et on passe à des coordonnées cylindriques (r, φ, h) centrées sur la cellule de pluie.

Etape 4: Détermination de la géométrie pour les gains d'antenne

Pour calculer d'une part le gain de chaque antenne au niveau de l'élément d'intégration de coordonnées (r, φ, h) en utilisant un diagramme de rayonnement d'antenne de ce type et d'autre part l'affaiblissement sur le trajet dans la cellule de pluie, il faut calculer l'angle de visée hors axe à la position de l'élément d'intégration et les longueurs du trajet depuis l'élément d'intégration jusqu'au bord de la cellule de pluie, dans la direction de chacune des stations. La Fig. 7 illustre la géométrie dans laquelle le point A représente un élément d'intégration arbitraire de coordonnées (r, φ, h) et le point B est la projection de ce point au sol. Cette géométrie est illustrée sur la Fig. 8.

FIGURE 7
Géométrie pour déterminer les gains d'antenne et l'affaiblissement sur le trajet dans la cellule de pluie

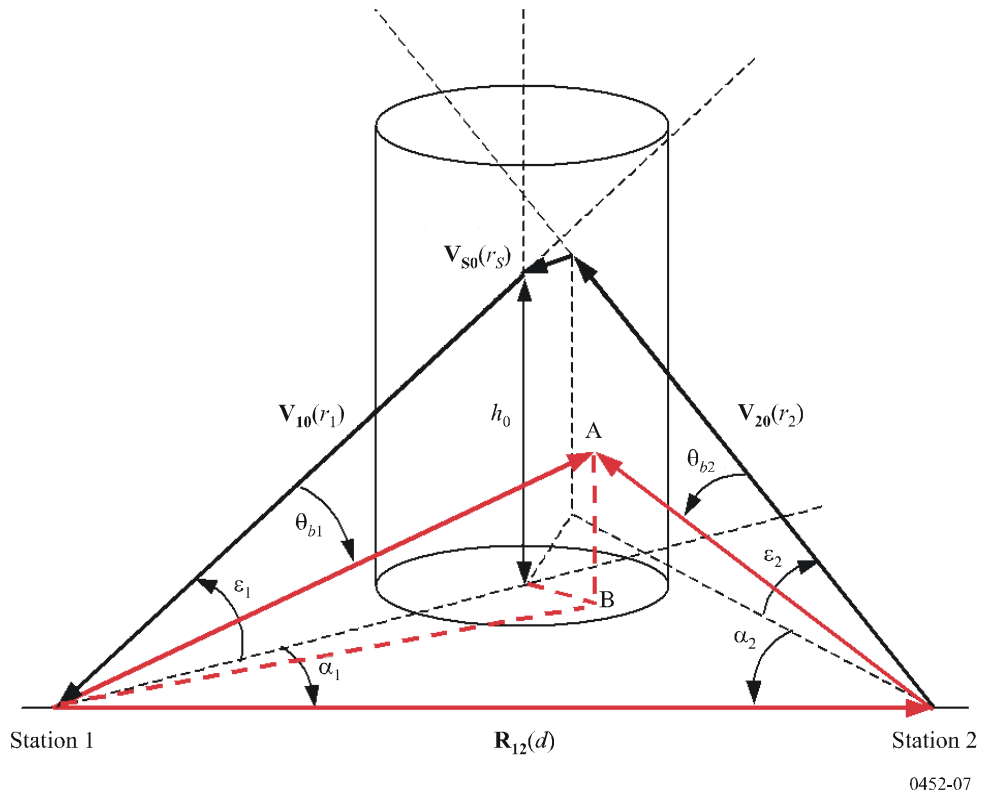
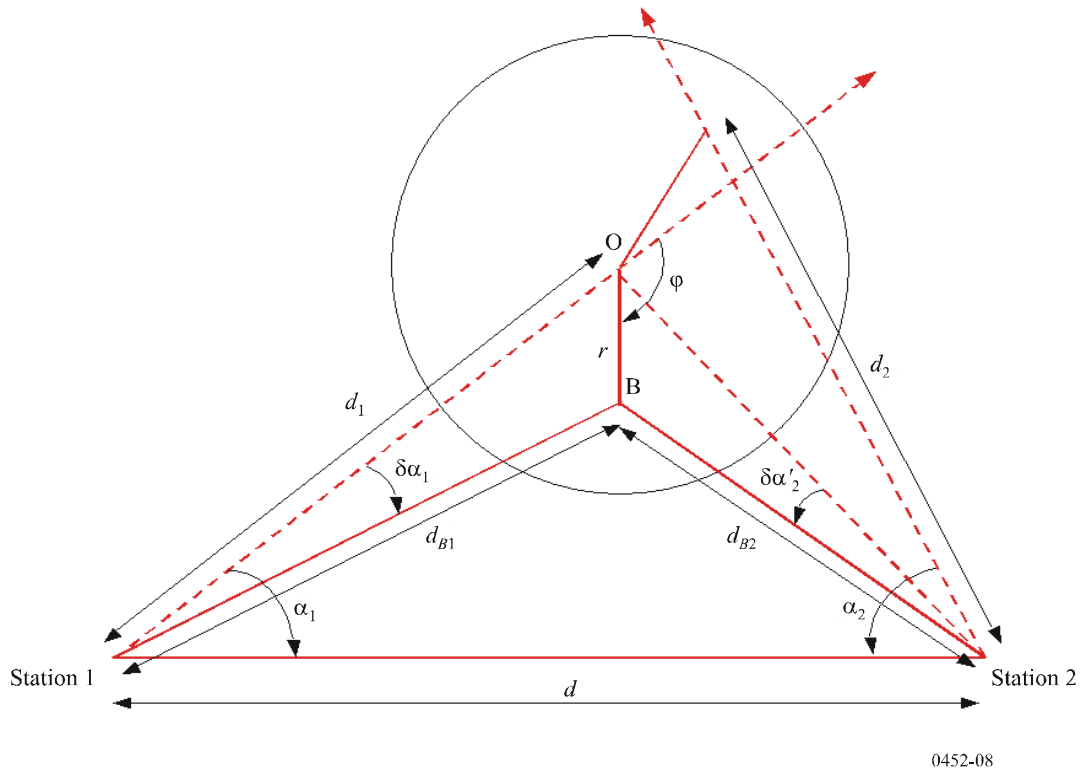


FIGURE 8
Vue du plan de la géométrie pour déterminer les gains d'antenne



On calcule la distance horizontale depuis la Station 1 jusqu'au point B:

$$d_{B1} = \sqrt{r^2 + d_1^2 + 2rd_1 \cos \varphi} \quad \text{km} \quad (96)$$

et l'angle entre ce trajet et la projection horizontale de l'axe du faisceau principal de l'antenne de la Station 1:

$$\delta \alpha_1 = \arcsin \left(\frac{r \sin \varphi}{d_{B1}} \right) \quad (97)$$

L'angle d'élévation du point A vu depuis la Station 1 est donné par:

$$\varepsilon_{A1} = \arctg \left(\frac{h}{d_{B1}} \right) \quad (98)$$

Le vecteur unité de longueur depuis la Station 1 jusqu'au point A est défini comme:

$$\mathbf{V}_{A1} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_{A1} \cos(\alpha_1 - \delta \alpha_1) \\ -\cos \varepsilon_{A1} \sin(\alpha_1 - \delta \alpha_1) \\ \sin \varepsilon_{A1} \end{bmatrix} \quad (99)$$

On détermine l'angle formé par l'axe de visée de l'antenne de la Station 1 et la droite passant par la Station 1 et le point de coordonnées (r, φ, h) :

$$\theta_{b1} = \arccos(\mathbf{V}_{A1} \cdot \mathbf{V}_{10}) \quad (100)$$

La distance entre la Station 1 et le point A est:

$$r_{A1} = \frac{d_{B1}}{\cos \varepsilon_{A1}} \quad \text{km} \quad (101)$$

et, notant que les vecteurs \mathbf{R}_{12} , \mathbf{R}_{A2} et $\mathbf{R}_{A1} = r_{A1} \mathbf{V}_{A1}$ forment un triangle fermé, on peut trouver le vecteur depuis la Station 2 vers le point A à (r, φ, h) à partir de:

$$\mathbf{R}_{A2} = \mathbf{R}_{12} - r_{A1} \mathbf{V}_{A1} \quad \text{km} \quad (102)$$

La distance entre la Station 2 et le point A est alors calculée comme suit:

$$r_{A2} = |\mathbf{R}_{A2}| \quad \text{km} \quad (103)$$

tandis que le vecteur unité depuis la Station 1 dans la direction de l'élément d'intégration est:

$$\mathbf{V}_{A2} = \frac{\mathbf{R}_{A2}}{r_{A2}} \quad (104)$$

On détermine ensuite l'angle formé par l'axe de visée de l'antenne de la Station 2 et la droite passant par la Station 2 et l'élément d'intégration, au point A de coordonnées (r, φ, h) :

$$\theta_{b2} = \arccos(-\mathbf{V}_{A2} \cdot \mathbf{V}_{20}) \quad (105)$$

La méthode ci-dessus permettant de déterminer les gains d'antenne ne convient que pour des antennes circulaires. Si l'antenne de la Station 1 est une antenne sectorielle ou une antenne équidirective, comme dans le cas des systèmes de radiodiffusion point-multipoint, on utilise une

méthode légèrement différente pour déterminer le gain de l'antenne qui variera uniquement dans la direction verticale (à l'intérieur de la zone couverte par la cellule de pluie). Dans ce cas, l'angle de visée hors axe dans la direction verticale est déterminé de façon plus simple à partir de:

$$\theta_{b1} = |\varepsilon_{A1} - \varepsilon_1| \quad (106)$$

De même, si l'antenne de la Station 2 est une antenne sectorielle ou une antenne équidirective, l'angle de visée hors axe dans la direction verticale est déterminé à partir de:

$$\theta_{b2} = |\varepsilon_{A2} - \varepsilon_2| \quad (107)$$

où:

$$\varepsilon_{A2} = \arctg\left(\frac{h}{d_{B2}}\right) \quad (108)$$

et

$$d_{B2} = \sqrt{d^2 + d_{B1}^2 - 2d \cdot d_{B1} \cos(\alpha_1 - \delta\alpha_1)} \quad \text{km} \quad (109)$$

Il est important de se rappeler que les angles de visée hors axe sont habituellement exprimés en degrés lorsqu'ils sont utilisés dans les diagrammes de rayonnement d'antenne classiques alors que les fonctions trigonométriques, dans la plupart des progiciels, effectuent les calculs en radians. Il faut donc effectuer une conversion simple de radians en degrés avant de pouvoir utiliser ces angles dans les procédures d'intégration.

Les gains d'antenne peuvent alors être calculés à partir du diagramme de rayonnement d'antenne, du gain maximal de l'antenne et de l'angle de visée hors axe qui est fonction de l'emplacement dans la cellule de pluie. On peut utiliser par défaut les diagrammes de rayonnement des Recommandations UIT-R P.620, UIT-R F.699 ou UIT-R F.1245, tout en notant que, pour ce dernier diagramme, le niveau des lobes latéraux est plus faible. On notera que les gains doivent être exprimés en termes linéaires pour l'intégration.

Etape 5: Détermination des longueurs des trajets dans la cellule de pluie

On détermine maintenant les affaiblissements sur le trajet depuis l'élément d'intégration en direction de chacune des stations A_1 et A_2 , lesquels dépendent des longueurs des trajets et de la position de l'élément d'intégration dans la cellule de pluie.

La cellule de pluie est divisée en trois volumes, comme illustré sur la Fig. 9. Dans le volume inférieur, la section efficace de diffusion, constante dans toute la cellule, est déterminée par la réflectivité du radar Z_R au niveau du sol avec $\zeta(h) = 1$. Les trajets à l'intérieur de la cellule de pluie vers chacune des stations, x_1 et x_2 , subissent l'affaiblissement dû à la pluie. Dans le volume intermédiaire, l'élément d'intégration est au-dessus de la hauteur de pluie et la section efficace de diffusion décroît en fonction de la hauteur au-dessus de la hauteur de pluie, à une cadence de $-6,5$ dB/km. Toutefois, un tronçon f de chaque trajet peut toujours traverser la cellule de pluie, au-dessous de la hauteur de pluie, selon la géométrie, et ces trajets subissent donc un affaiblissement supplémentaire dû à la pluie le long de ces tronçons de trajet $f_{x1,2}$ qui traversent la cellule. Dans le volume supérieur, l'élément d'intégration est situé au-dessus de la cellule de pluie et aucun tronçon des trajets ne traverse la cellule de pluie au-dessous de la hauteur de pluie. Ces trajets ne subissent donc pas d'affaiblissement dû à la pluie.

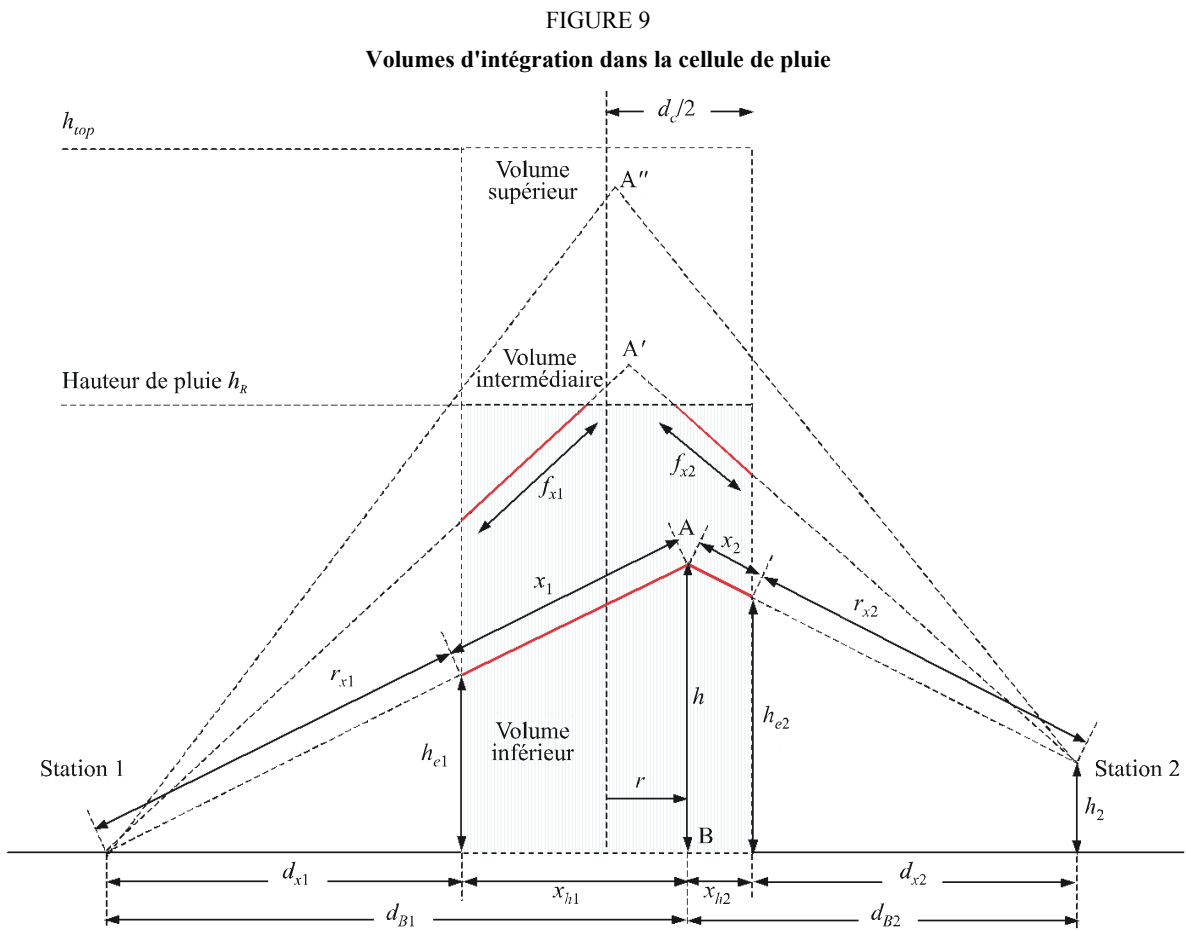
Les longueurs des trajets dans ces volumes sont évaluées dans les étapes qui suivent.

Volume inférieur

Dans le volume inférieur, l'élément d'intégration est toujours au-dessous de la hauteur de pluie h_R , et les trajets à l'intérieur de la cellule de pluie subissent tous un affaiblissement dû à la pluie:

$$A_{1,2} = \gamma_{R1,2} x_{1,2} \quad \text{dB} \quad (110)$$

où $\gamma_{R1,2} = k_{1,2} R^{\alpha_{1,2}}$ est l'affaiblissement linéique dû à la pluie (dB/km), et les coefficients $k_{1,2}$ et $\alpha_{1,2}$ sont donnés en fonction de la fréquence f , de la polarisation τ et de l'angle d'élévation du trajet $\epsilon_{1,2}$ (Recommandation UIT-R P.838). On notera que l'affaiblissement linéique dû à la pluie dépend de l'angle d'élévation du trajet et, en principe, devrait être calculé pour chaque élément d'intégration, et pour chacune des valeurs des coordonnées (r, φ, h) . Toutefois, la variation en fonction de l'angle d'élévation est faible et il suffit de déterminer les valeurs de γ_R une seule fois, pour les trajets en direction de chaque station, sur la base des angles d'élévation des antennes de chaque station.



0452-09

Les longueurs des trajets r_{x1} , r_{x2} , x_1 et x_2 sont calculées à partir de la géométrie, comme suit. La Fig. 10 montre une vue du plan horizontal de l'élément d'intégration A passant par son point de projection au sol B. Ici, la valeur corrigée de la hauteur de la Station 2, h_2 , est supposée au départ être égale à zéro. Il en est tenu compte plus tard.

On calcule la distance horizontale d_{x1} entre la Station 1 et le bord de la cellule de pluie (point X_1) à partir de la règle du cosinus (en prenant le signe négatif étant donné que le calcul se fait jusqu'au bord le plus proche):

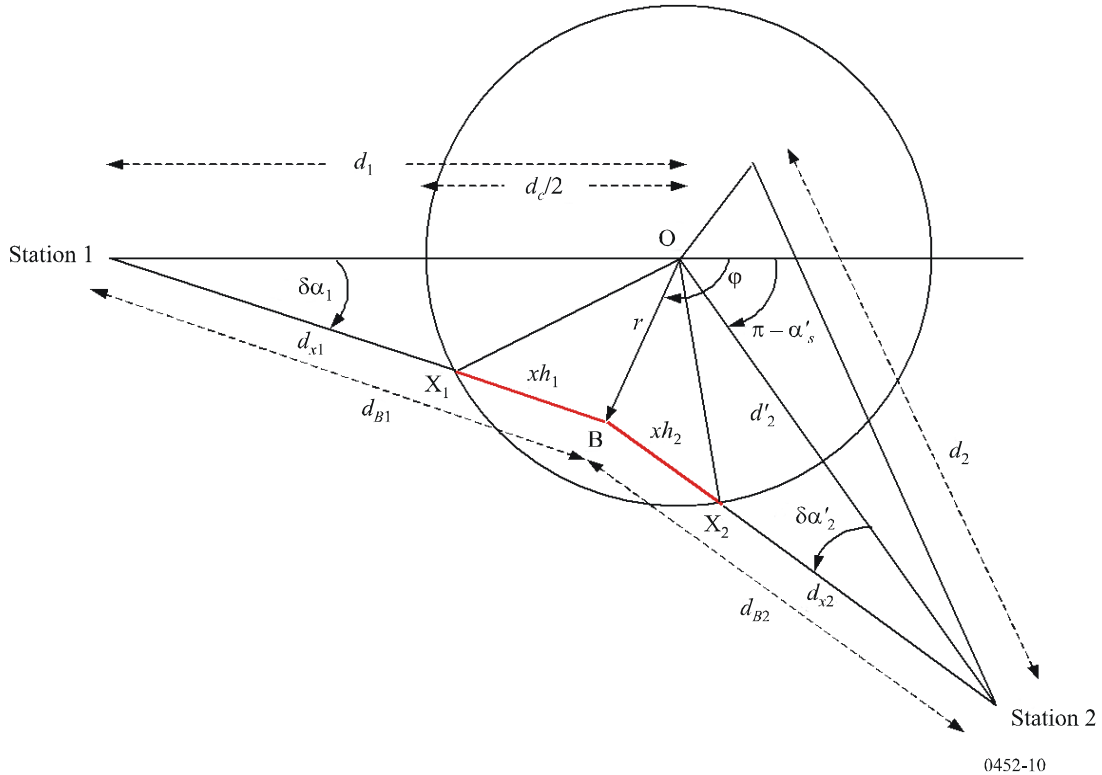
$$d_{x1} = d_1 \cos \delta\alpha_1 - \sqrt{d_1^2 \cos^2 \delta\alpha_1 - d_1^2 + \left(\frac{d_c}{2}\right)^2} \quad \text{km} \quad (111)$$

La distance sur le trajet oblique jusqu'au bord de la cellule de pluie est alors:

$$r_{x1} = \frac{d_{x1}}{\cos \epsilon_{A1}} \quad \text{km} \quad (112)$$

FIGURE 10

Vue du plan de la géométrie de la diffusion passant par l'élément d'intégration



0452-10

On détermine l'angle de décalage de l'élément d'intégration au point A pour la Station 2:

$$\delta\alpha_2 = \arctg\left(\frac{-r \sin(\varphi + \alpha'_s)}{d'_2 + r \cos(\varphi + \alpha'_s)}\right) \quad (113)$$

où α'_s est donné par

$$\alpha'_s = \arcsin\left(\frac{d}{d'_2} \sin \alpha_1\right) \quad (114)$$

et

$$d'_2 = \sqrt{d^2 + d_1^2 - 2d \cdot d_1 \cos \alpha_1} \quad \text{km} \quad (115)$$

On obtient la distance horizontale d_{x2} à partir de la règle du cosinus:

$$d_{x2} = d'_2 \cos \delta\alpha'_2 - \sqrt{\left(\frac{d_c}{2}\right)^2 - d_1^2 \sin^2 \delta\alpha'_2} \quad \text{km} \quad (116)$$

On calcule la distance sur le trajet oblique r_{x2} jusqu'à la Station 2, en passant par la cellule de pluie:

$$r_{x2} = \frac{d_{x2}}{\cos \varepsilon_{A2}} \quad \text{km} \quad (117)$$

Maintenant, il faut examiner deux cas:

Cas 1: la Station 1 est située en dehors de la cellule de pluie, c'est-à-dire lorsque $d_1 > d_c/2$. Dans ce cas, seul un tronçon du trajet allant de l'élément d'intégration A jusqu'à la Station 1 sera situé dans la cellule de pluie et subira donc l'affaiblissement;

Cas 2: l'angle d'élévation est très grand et la Station 1 est située dans la cellule de pluie, c'est-à-dire lorsque $d_1 \leq d_c/2$. Dans ce cas, la totalité du trajet jusqu'à la hauteur de pluie sera toujours située dans la cellule de pluie et subira donc l'affaiblissement.

On détermine la longueur du trajet x_1 pour l'affaiblissement dû à la pluie, le long du trajet vers la Station 1 à partir de l'expression suivante:

$$x_1 = \begin{cases} r_{A1} - r_{x1} & \text{si } d_1 > \frac{d_c}{2} \\ r_{A1} & \text{si } d_1 \leq \frac{d_c}{2} \end{cases} \quad \text{km} \quad (118)$$

et la longueur du trajet x_2 pour l'affaiblissement dû à la pluie, le long du trajet vers la Station 2 à partir de:

$$x_2 = \begin{cases} r_{A2} - r_{x2} & \text{si } d_2 > \frac{d_c}{2} \\ r_{A2} & \text{si } d_2 \leq \frac{d_c}{2} \end{cases} \quad \text{km} \quad (119)$$

Ainsi, dans les cas où l'élément d'intégration est au-dessous de la hauteur de pluie, l'affaiblissement dans la cellule de pluie peut être déterminé, en termes linéaires, à partir de:

$$A_b = \exp[-k(\gamma_{R1}x_1 + \gamma_{R2}x_2)] \quad \text{si } h \leq h_R \quad (120)$$

où $k = 0,23026$ est une constante pour convertir l'affaiblissement (dB) en népers.

Volume intermédiaire et volume supérieur

Dans ces volumes, l'élément d'intégration est au-dessus de la hauteur de pluie, h_R , mais certains tronçons des trajets vers chacune des stations peuvent traverser la cellule de pluie au-dessous de la hauteur h_R . Ce sera le cas uniquement lorsque les angles d'élévation de l'élément d'intégration A, $\varepsilon_{A1,2}$, sont inférieurs aux angles $\varepsilon_{C1,2}$ formés, par la droite passant par chaque station, et le coin supérieur le plus proche de la cellule de pluie, c'est-à-dire si:

$$\varepsilon_{A1} < \varepsilon_{C1} = \arctg\left(\frac{h_R}{d_{x1}}\right) \quad \text{et} \quad \varepsilon_{A2} < \varepsilon_{C2} = \arctg\left(\frac{h_R - h_2}{d_{x2}}\right)$$

Dans ces cas, l'affaiblissement résultant doit être pris en compte. Cela est particulièrement vrai pour le Cas 2 ci-dessus lorsque l'une des antennes a un angle d'élévation très élevé et lorsque la station est située dans la cellule de pluie.

Sur la base de la Fig. 9, on peut déterminer les hauteurs auxquelles les rayons depuis l'élément d'intégration au point A traversent les bords de la cellule de pluie, à partir des rapports des distances

horizontales entre chacune des stations et, d'une part, le bord de la cellule de pluie et, d'autre part, le point B:

$$\begin{aligned} h_{e1} &= h \cdot \frac{d_{x1}}{d_{B1}} && \text{km} \\ h_{e2} &= (h - h_2) \cdot \frac{d_{x2}}{d_{B2}} + h_2 \end{aligned} \quad (121)$$

On peut déterminer les tronçons des longueurs des trajets $f_{x1,2}$ qui traversent la cellule de pluie, à partir des rapports:

$$f_{x1,2} = \begin{cases} x_{1,2} \left(\frac{h_R - h_{e1,2}}{h - h_{e1,2}} \right) & \text{si } h > h_R > h_{e1,2} \text{ et } \varepsilon_{A1,2} < \varepsilon_{C1,2} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad \text{km} \quad (122)$$

Enfin, on calcule l'affaiblissement, en termes linéaires, dans les cas où l'élément d'intégration est au-dessus de la hauteur de pluie, h_R :

$$A = \exp \left[-k \left\{ 6,5(h - h_R) + \gamma_{R1} f_{x1} + \gamma_{R2} f_{x2} \right\} \right] \quad \text{pour } h \geq h_R \quad (123)$$

Cette étape permet de définir l'intégrande pour la fonction de transfert de diffusion.

Etape 6: Affaiblissement en dehors de la cellule de pluie

Dans la formule utilisée ici, la pluie est limitée à une cellule de diamètre d_c , définie par la géométrie de l'Etape 2, et le taux de précipitation est considéré comme uniforme à l'intérieur de cette cellule. En général, la pluie débordera de cette région, décroissant en intensité au fur et à mesure que la distance par rapport au centre de la cellule augmente et ceci doit être pris en considération. Toutefois, si la station est située à l'intérieur de la cellule de pluie, aucun affaiblissement extérieur dû à la pluie ne devra être pris en compte pour cette station. Par ailleurs, si l'élément d'intégration est suffisamment loin au-dessus de la hauteur de pluie de sorte qu'aucun tronçon du trajet vers l'une ou l'autre station ne traverse la cellule de pluie, aucun affaiblissement extérieur n'est alors inclus le long de ce trajet.

Comme approximation, on suppose que la pluie en dehors de la cellule de pluie s'affaiblit selon une distance d'échelle définie par:

$$r_m = 600 R^{-0,5} 10^{-(R+1)^{0,19}} \quad \text{km} \quad (124)$$

Pour la diffusion au-dessous de la hauteur de pluie, on calcule l'affaiblissement en dehors de la cellule de pluie à l'aide de l'expression (125):

$$A_{ext1,2} = \begin{cases} \frac{\gamma_{R1,2} r_m}{\cos \varepsilon_{A1,2}} \left[1 - \exp \left(-\frac{d_{x1,2}}{r_m} \right) \right] & \text{si } d_{1,2} > \frac{d_c}{2} \text{ et } f_{x1,2} \neq 0 \\ 0 & \text{si } d_{1,2} \leq \frac{d_c}{2} \text{ ou } f_{x1,2} = 0 \end{cases} \quad \text{dB} \quad (125)$$

c'est-à-dire, l'affaiblissement le long de l'un ou l'autre trajet est fixé à zéro si la station considérée est située dans la cellule de pluie ($d_1 \leq d_c/2$) ou si l'élément d'intégration est au-dessus de la cellule de pluie et aucun tronçon du trajet ne traverse la cellule de pluie, ce qui est déterminé par le fait que les tronçons de trajet $f_{x1,2}$ sont égaux à zéro.

Etape 7: Intégration numérique de la fonction de transfert de diffusion

L'intégration se fait en deux parties, une pour la diffusion au-dessous de la hauteur de pluie et une pour la diffusion au-dessus de la hauteur de pluie:

$$C_b = \int_{h_{min}}^{h_R} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{d_c}{2}} \frac{G_1 G_2}{r_{A1}^2 r_{A2}^2} \exp[-k(\gamma_{R1} x_1 + \gamma_{R2} x_2 + A_{ext1} + A_{ext2})] \cdot r dr d\varphi dh \quad (126)$$

$$C_a = \int_{h_R}^{h_{top}} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{d_c}{2}} \frac{G_1 G_2}{r_{A1}^2 r_{A2}^2} \exp[-k(6,5(h - h_R) + \gamma_{R1} f_{x1} + \gamma_{R2} f_{x2} + A_{ext1} + A_{ext2})] \cdot r dr d\varphi dh \quad (127)$$

où les gains d'antenne sont exprimés en termes linéaires, en fonction des angles de visée hors axe $\theta_{b1,2}(r, \varphi, h)$.

L'intégration, en coordonnées cylindriques, est réalisée sur les plages de valeurs suivantes: pour r de 0 au rayon de la cellule de pluie, $d_c/2$ et pour φ de 0 à 2π . Des limitations peuvent peser sur la troisième variable d'intégration, h , hauteur à l'intérieur de la cellule de pluie. La hauteur minimale, h_{min} , est fonction de la visibilité de la cellule de pluie depuis chacune des stations. S'il y a un obstacle à proximité de l'une ou l'autre station faisant effet d'écran, la diffusion depuis des hauteurs, dans la cellule de pluie, qui ne sont pas visibles depuis l'une ou l'autre station devrait être exclue de l'intégration. La hauteur minimale d'intégration peut donc être déterminée à partir des angles de site de l'horizon pour chacune des stations, comme suit:

$$h_{min} = \max(d_{x1} \text{tg } \varepsilon_{H1}, d_{x2} \text{tg } \varepsilon_{H2}) \quad \text{km} \quad (128)$$

A noter que l'on utilise ici des valeurs locales étant donné que tout effet d'écran inhérent dû à la courbure de la Terre pour un angle d'élévation de zéro degré est déjà pris en compte lorsque l'on détermine les angles de visée hors axe.

On peut définir la hauteur maximale d'intégration, h_{top} , pour limiter au minimum les contraintes de calcul étant donné qu'en général il ne sera pas nécessaire d'intégrer la section efficace de diffusion aux hauteurs au-dessus desquelles les niveaux dans les lobes latéraux de l'antenne sont sensiblement réduits. Par défaut, on suppose que la hauteur au-dessus de laquelle l'intégration peut être terminée sans perte de précision est de 15 km.

Intégration numérique: Il existe de nombreuses méthodes d'intégration numérique et de nombreux progiciels mathématiques comportent des fonctions d'intégration inhérentes qui peuvent être utilisées efficacement. Lorsque l'utilisateur souhaite mettre au point un progiciel spécialisé dans d'autres langages de programmation, les méthodes basées sur des techniques itératives de subdivision en deux parties des intervalles d'intégration se sont avérées efficaces. Une telle technique est la méthode de Romberg, qui est une variante d'ordre supérieur de la méthode de référence des trapèzes (règle de Simpson), méthode d'intégration par subdivisions successives en deux parties des intervalles d'intégration.

La méthode d'intégration de Romberg utilise une combinaison de deux méthodes numériques pour calculer une approximation d'une véritable intégrale, c'est-à-dire:

$$I = \int_a^b y(x) dx$$

La méthode des trapèzes élargie est utilisée pour calculer une séquence d'approximations de l'intégrale, les intervalles entre les évaluations étant à chaque fois divisés par deux. On utilise ensuite une extrapolation polynomiale pour extrapoler la séquence jusqu'à un intervalle de longueur nulle. Cette méthode peut être résumée à l'aide de la boucle de pseudo-code:

```

Indice = 1
WHILE estimated_error > desired_error DO
  S(Index) = approximation par la méthode des trapèzes utilisant 2indice intervalles
  I = Extrapolation polynomiale de S
  indice = indice + 1
ENDWHILE

```

La méthode des trapèzes élargie

Par interpolation linéaire entre $N + 1$ abscisses équidistantes (x_i, y_i) , on peut calculer une approximation de l'intégrale comme suit:

$$I \approx T^N = h(N) \left(\frac{1}{2} y_0 + y_1 + \dots + y_{N-1} + \frac{1}{2} y_N \right)$$

où:

$$h(N) = \frac{b-a}{N} : \text{intervalle entre les abscisses.}$$

Le nombre d'intervalles peut être doublé par récurrence:

$$T^{2N} = \frac{1}{2} T^N + h(2N)(y_1 + y_3 + \dots + y_{N-3} + y_{N-1})$$

La méthode de Romberg permet de construire par récurrence une séquence $S(i) = T^{2^i}$.

Extrapolation polynomiale

A la limite, l'erreur dans l'approximation par la méthode des trapèzes élargie de I est un polynôme en h^2 , c'est-à-dire:

$$I = T^N + \varepsilon^N$$

où:

$$\varepsilon^N \cong P(h^2(N))$$

et

P : polynôme inconnu.

La séquence des approximations par la méthode des trapèzes, $T^N = \varepsilon^N$, est également un polynôme en h^2 et on peut donc utiliser une extrapolation polynomiale pour estimer la limite lorsque $h \rightarrow 0$. Si l'on dispose de m approximations par la méthode des trapèzes, on peut faire passer un et un seul polynôme de degré $M - 1$ par les points $(h^2(n), T^n)$ pour $n = 1, 2, 4, 8, \dots, 2^{M-1}$. Une évaluation de ce polynôme unique en $h = 0$ donne une approximation de la limite de la méthode des trapèzes.

Habituellement on utilise la méthode de Neville pour calculer la valeur du polynôme en $h = 0$. Cette méthode est efficace et permet d'obtenir une estimation de l'erreur qui peut être utilisée pour terminer l'intégration de Romberg. Cette méthode est une approximation par interpolations linéaires successives de l'interpolation polynomiale de Lagrange de degré supérieur. La méthode de

Lagrange peut être décrite comme suit. Pour $M + 1$ points (x_i, y_i) , un polynôme de degré m peut être défini comme étant une combinaison linéaire de fonctions de base:

$$P(x) \equiv \sum_{i=0}^n y_i L_i(x) \equiv \sum_{i=0}^n y_i \prod_{\substack{k=0 \\ k \neq i}}^n \frac{(x - x_k)}{(x_i - x_k)}$$

c'est-à-dire:

$$L_i(x) = \frac{(x - x_0) \dots (x - x_{i-1})(x - x_{i+1}) \dots (x - x_n)}{(x_i - x_0) \dots (x_i - x_{i-1})(x_i - x_{i+1}) \dots (x_i - x_n)}$$

Pour cette méthode d'interpolation, toutes les ordonnées y_i doivent être connues afin de trouver une estimation de la solution à $x = 0$; pour des problèmes complexes, cette méthode n'est pas efficace étant donné qu'elle n'exploite pas les interpolations précédentes pour des itérations vers des ordres supérieurs. La méthode de Neville est une méthode par récurrence basée sur la relation qui existe entre une approximation d'un polynôme et les deux approximations précédentes de ce polynôme. Ainsi, pour deux points quelconques (x_k, y_k) , il existe un et un seul polynôme de degré 0, c'est-à-dire une droite passant par ces deux points $P_k = y_k$. On effectue une seconde itération dans laquelle on fait passer le polynôme par des paires de points donnant P_{12}, P_{23}, \dots , et on répète la procédure pour construire une pyramide d'approximations:

$$\begin{array}{cccc} P_1 & & & \\ & P_{12} & & \\ P_2 & & P_{123} & \\ & P_{23} & & P_{1234} \\ P_3 & & P_{234} & \\ & P_{34} & & \\ P_4 & & & \end{array}$$

Le résultat final peut être représenté comme suit:

$$P_{i(i+1) \dots (i+m)} = \frac{(x - x_{i+m})P_{i(i+1) \dots (i+m-1)} + (x_i - x)P_{(i+1)(i+2) \dots (i+m)}}{x_i - x_{i+m}}$$

La méthode de Neville est donc une méthode par récurrence permettant de construire la pyramide colonne par colonne, de façon efficace du point de vue des calculs.

Dans la pratique, l'extrapolation polynomiale devient instable lorsqu'on fait passer le polynôme par un grand nombre de points; ainsi, dans l'intégration de Romberg, on utilise généralement une extrapolation polynomiale du quatrième degré correspondant aux cinq dernières approximations par la méthode des trapèzes.

Dans les méthodes d'intégration numérique comme celles qui utilisent des techniques de subdivision en deux des intervalles d'intégration, on procède à des itérations jusqu'à l'obtention d'un certain critère de précision: l'itération se termine lorsque la différence entre itérations successives est plus petite qu'une fraction préalablement définie du résultat précédent. En général, cette fraction se situe entre 10^{-3} et 10^{-6} , la dernière valeur étant proche des fonctionnalités offertes par les processeurs à 32 bits. Il faut faire preuve de prudence lorsqu'on utilise de grandes valeurs au-dessus de cette gamme étant donné que les erreurs dans les valeurs calculées de l'affaiblissement peuvent augmenter. En général, une valeur de 10^{-4} est un bon compromis entre précision et rapidité de calcul.

Trois intégrations numériques imbriquées sont nécessaires pour effectuer l'intégration volumique tridimensionnelle sur la cellule de pluie, en coordonnées cylindriques, l'intégration extérieure se faisant sur le paramètre de hauteur h , par exemple. L'intégration se fait aussi sur le paramètre

azimut φ pour une valeur particulière de h , et sur le paramètre rayon r pour des valeurs particulières de (h, φ) .

Il convient de noter qu'il faut, en général, effectuer de nombreuses itérations de la fonction de transfert de diffusion pour obtenir la précision voulue, en particulier dans les cas où les gains d'antenne sont élevés et lorsque le produit des gains d'antenne varie de 60 dB ou plus le long du diamètre de la cellule de pluie. Les temps de calcul peuvent donc être de l'ordre de plusieurs dizaines de minutes, voire de quelques heures dans les cas extrêmes, même avec des unités de traitement très rapides.

Le BR dispose d'une version logicielle de la méthode écrite en Fortran, basée sur la méthode de Romberg et une version écrite en Mathcad avec des fonctions d'intégration incorporées.

Etape 8: Détermination d'autres facteurs d'affaiblissement

On calcule l'écart par rapport à la diffusion de Rayleigh en utilisant l'équation (58) avec l'angle de diffusion φ_S donné par l'équation (73).

On calcule l'affaiblissement le long des trajets dû à l'absorption par les gaz atmosphériques (Annexe 2 de la Recommandation UIT-R P.676) pour les affaiblissements linéiques γ_o et γ_w et les hauteurs équivalentes h_o et h_w , respectivement pour un air sec et pour la vapeur d'eau. On calcule les affaiblissements à l'aide des expressions ci-après pour l'affaiblissement sur le trajet entre deux altitudes au-dessus du niveau de la mer, la valeur supérieure étant déterminée par la hauteur du point de quasi-intersection entre les deux axes des faisceaux principaux des antennes. Cette méthode est une approximation étant donné que l'affaiblissement effectif par les gaz variera pour chaque élément de diffusion dans le volume de diffusion. Toutefois, étant donné que l'affaiblissement par les gaz est en général une composante mineure de l'affaiblissement de transmission total et qu'il varie peu, comparé aux incertitudes qui pèsent sur d'autres paramètres comme le taux de précipitation, la hauteur de pluie ou la géométrie de la cellule de pluie elle-même, on considère que cette simplification est justifiée. La méthode ci-après permet d'avoir des estimations de l'affaiblissement par les gaz avec une précision acceptable pour l'ensemble de la procédure.

Les altitudes inférieures pour chaque station sont données par les valeurs locales $h_{1_loc} = h_{2_loc}$. L'altitude supérieure h_p est la hauteur du point de quasi-intersection, compte tenu de la courbure de la Terre, c'est-à-dire la valeur locale obtenue à partir de:

$$h_p = h_0 + \sqrt{d_1^2 + r_{eff}^2} - r_{eff} + h_c \quad \text{km} \quad (129)$$

Pour des angles d'élévation compris entre 5° et 90° , l'affaiblissement entre deux altitudes est déterminé à partir de la différence entre les affaiblissements totaux sur le trajet oblique pour chaque altitude.

$$A_{o_i} = \frac{\gamma_o h_o - \gamma_o h_o \left[\exp\left(-\frac{h_{i_loc}}{h_o}\right) - \exp\left(-\frac{h_p}{h_o}\right) \right]}{\sin \varepsilon_{i_loc}} \quad \text{dB} \quad (130)$$

$$A_{w_i} = \frac{\gamma_w h_o - \gamma_w h_o \left[\exp\left(-\frac{h_{i_loc}}{h_w}\right) - \exp\left(-\frac{h_p}{h_w}\right) \right]}{\sin \varepsilon_{i_loc}} \quad \text{dB} \quad (131)$$

où l'indice i renvoie à chacune des deux stations et ε_{i_loc} représente l'angle d'élévation local de chaque antenne.

La densité de vapeur d'eau, ρ , utilisée pour déterminer l'affaiblissement linéique γ_w est la valeur hypothétique au niveau de la mer calculée à partir de la valeur au niveau du sol pour les stations (valeur qui peut être supposée identique):

$$\rho = \rho_g \exp\left(\frac{h_{i_loc}}{2}\right) \quad \text{g/m}^3 \quad (132)$$

Pour des angles d'élévation compris entre 0° et 5° , il faut tenir compte des effets de la réfraction. Les angles d'élévation pour le trajet supérieur sont déterminés à partir de:

$$\varepsilon'_i = \arccos\left(\frac{h_1 + r_{eff}}{h_p + r_{eff}} \cos \varepsilon_{i_loc}\right) \quad (133)$$

L'affaiblissement sur le trajet est alors donné par les expressions suivantes:

Pour l'affaiblissement dû à l'air sec:

$$A_{o_i} = \gamma_o \sqrt{h_o} \left[\frac{\sqrt{h_{i_loc} + r_{eff}} \cdot F\left(\text{tg } \varepsilon_i \sqrt{\frac{h_{i_loc} + r_{eff}}{h_o}}\right) \exp\left(-\frac{h_{i_loc}}{h_o}\right)}{\cos \varepsilon_{i_loc}} \right. \\ \left. - \frac{\sqrt{h_p + r_{eff}} \cdot F\left(\text{tg } \varepsilon'_i \sqrt{\frac{h_p + r_{eff}}{h_o}}\right) \exp\left(-\frac{h_p}{h_o}\right)}{\cos \varepsilon'_i} \right] \quad \text{dB} \quad (134)$$

et pour l'affaiblissement dû à la vapeur d'eau:

$$A_{w_i} = \gamma_w \sqrt{h_w} \left[\frac{\sqrt{h_{i_loc} + r_{eff}} \cdot F\left(\text{tg } \varepsilon_i \sqrt{\frac{h_{i_loc} + r_{eff}}{h_w}}\right) \exp\left(-\frac{h_{i_loc}}{h_w}\right)}{\cos \varepsilon_{i_loc}} \right. \\ \left. - \frac{\sqrt{h_p + r_{eff}} \cdot F\left(\text{tg } \varepsilon'_i \sqrt{\frac{h_p + r_{eff}}{h_w}}\right) \exp\left(-\frac{h_p}{h_w}\right)}{\cos \varepsilon'_i} \right] \quad \text{dB} \quad (135)$$

où la fonction, F , est définie par:

$$F(x) = \frac{1}{0,661x + 0,339\sqrt{x^2 + 5,51}} \quad (136)$$

On tient également compte de la désadaptation de polarisation, M , qui est appropriée.

Etape 9: Détermination de la distribution cumulative de l'affaiblissement de transmission

Pour chaque paire de valeurs du taux de précipitation et de la hauteur de pluie, on calcule l'affaiblissement de transmission, conformément aux Etapes 5 à 8, à l'aide de l'expression suivante:

$$L = 208 - 20 \log f - 10 \log Z_R - 10 \log(C_b + C_a) + 10 \log S + A_g - M \quad \text{dB} \quad (137)$$

Après avoir évalué toutes les combinaisons possibles de taux de précipitation et de hauteur de pluie, les valeurs de l'affaiblissement de transmission résultantes (dB) sont alors ramenées à l'entier supérieur le plus proche dB (en utilisant par exemple une fonction *plafond*) et les probabilités (en pourcentage) de toutes les combinaisons donnant le même affaiblissement sont additionnées, afin de calculer la probabilité totale pour chaque niveau de l'affaiblissement de transmission. On convertit ensuite la fonction de densité de probabilité résultante en la distribution cumulative de l'affaiblissement de transmission correspondante en faisant la somme des pourcentages pour les valeurs croissantes de l'affaiblissement.

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. 11 fournit la moyenne annuelle de ΔN ;
- la Fig. 12 donne les contours du maximum de la valeur moyenne mensuelle de ΔN .

FIGURE 11
Valeurs moyennes annuelles de ΔN

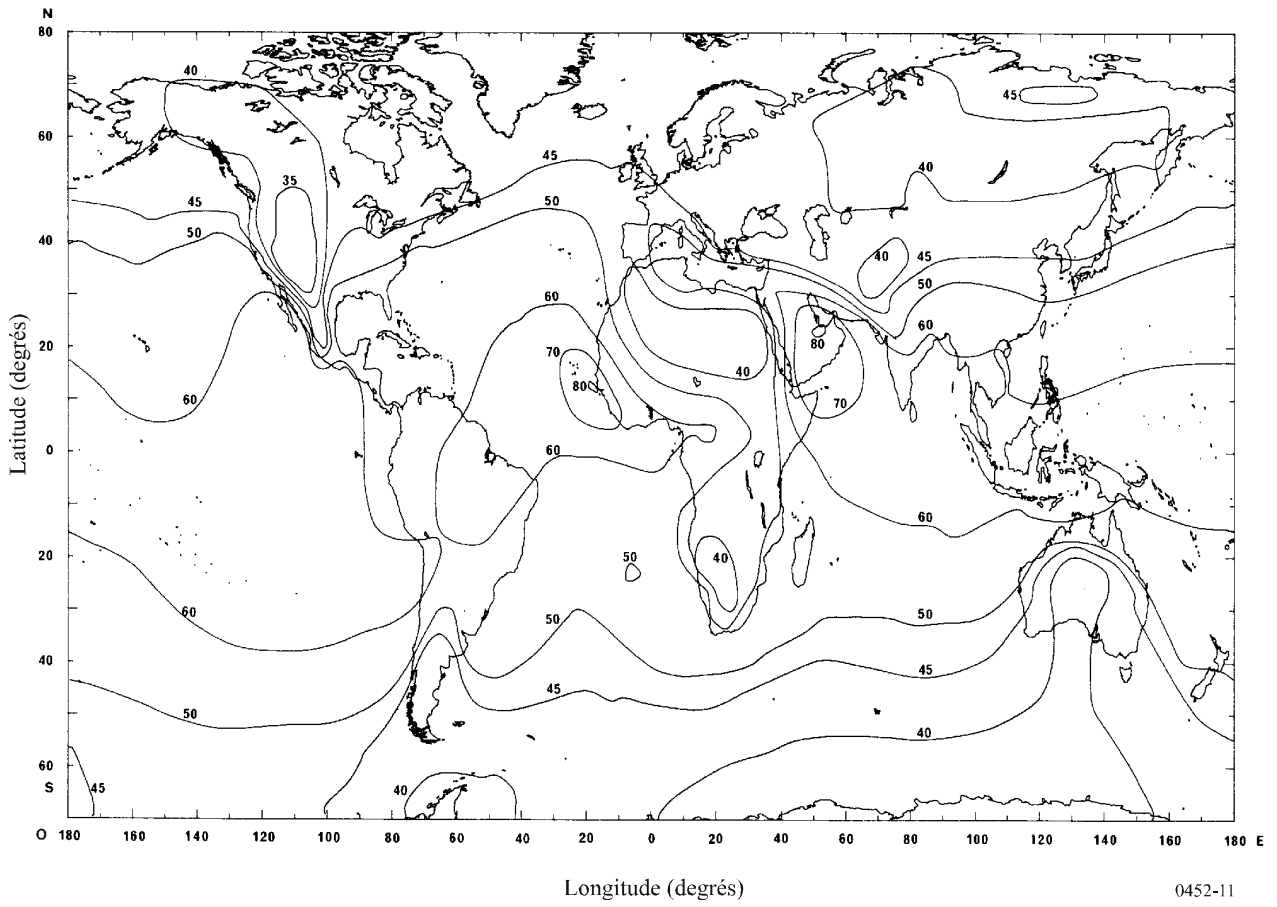
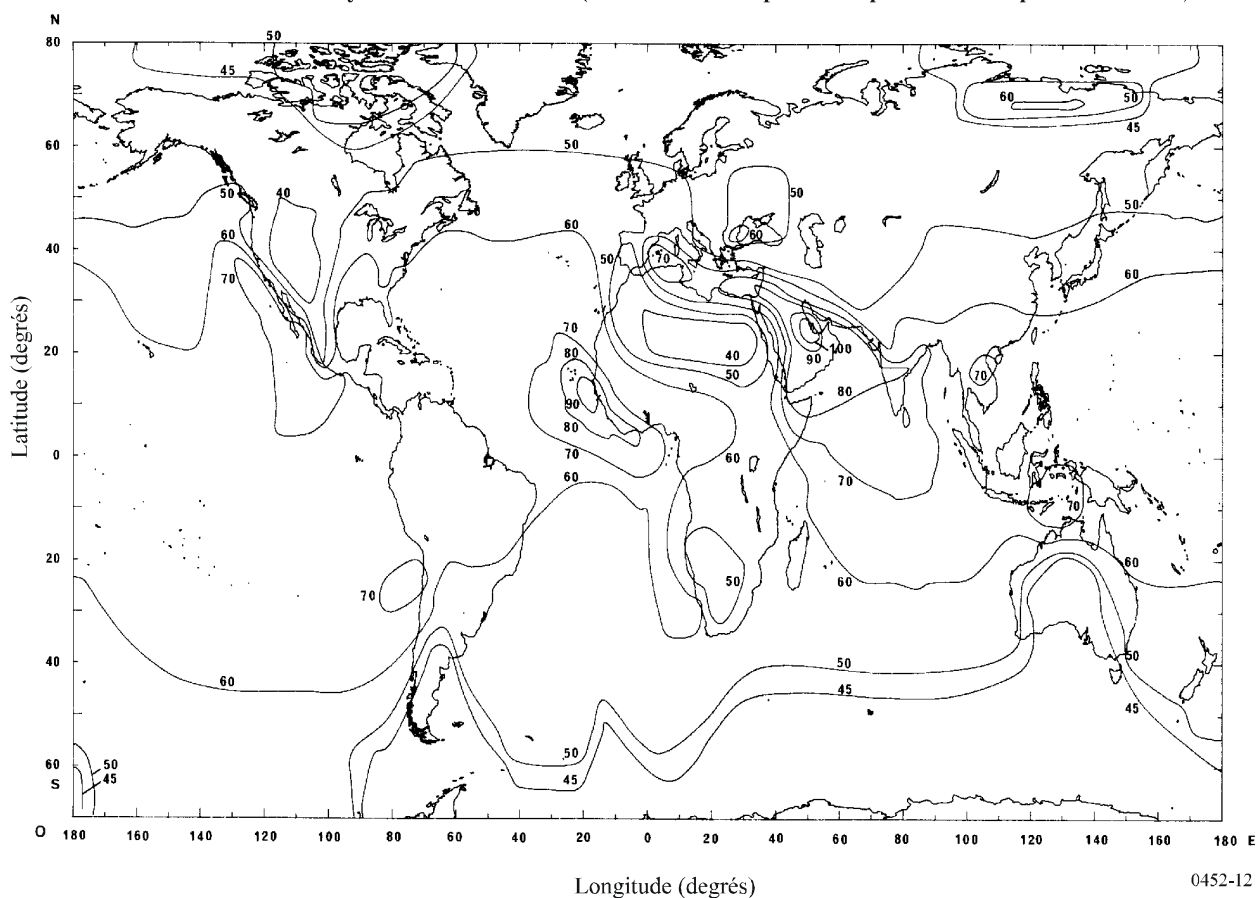


FIGURE 12

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



0452-12

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

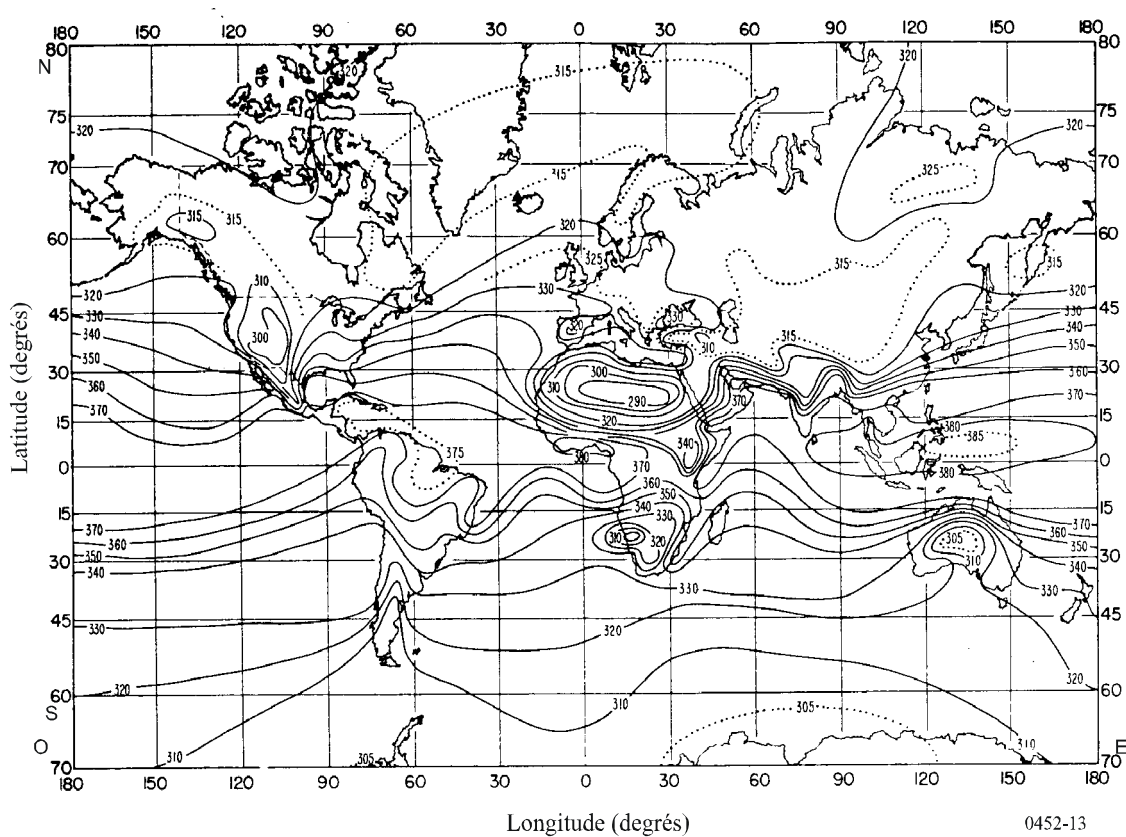
La carte du coïndice moyen au niveau de la mer, N_0 , applicable au modèle de diffusion troposphérique, est donnée à la Fig. 13.

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 13
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

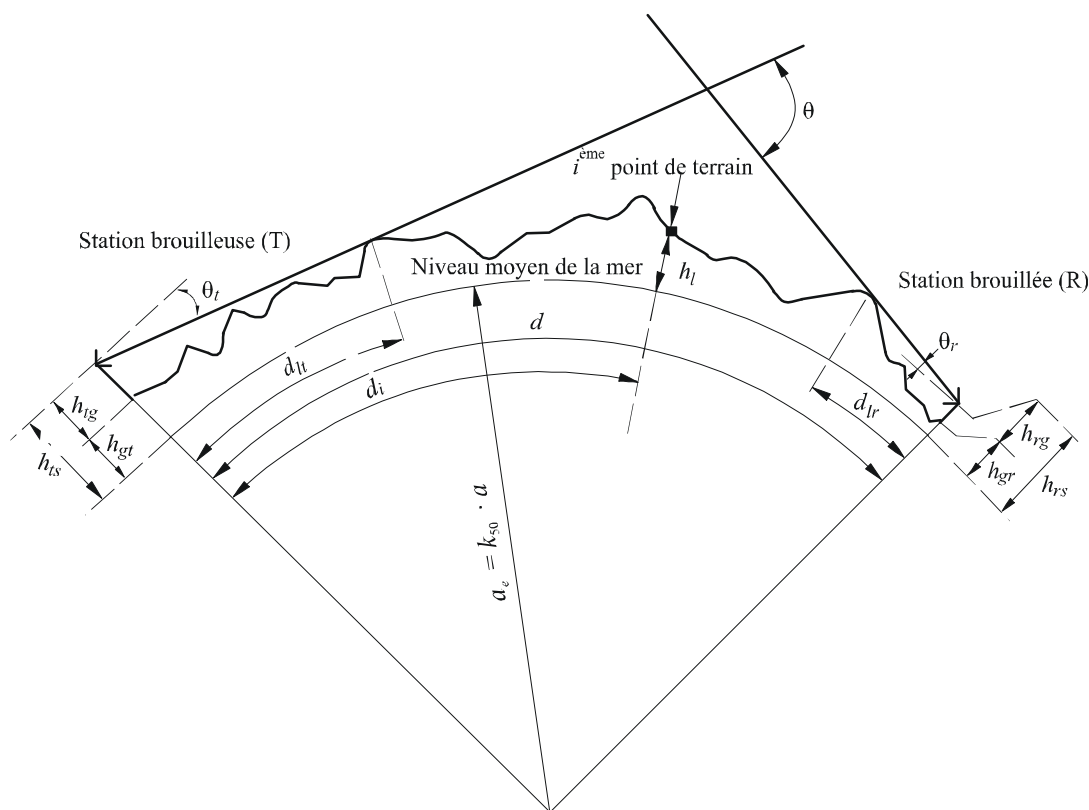
Partant des coordonnées géographiques de la station brouilleuse (ϕ_t, ψ_t) et de la station brouillée (ϕ_r, ψ_r) il faut, en utilisant une base de données topographiques ou des cartes de contours à grande échelle appropriées, trouver les hauteurs du terrain (par rapport au niveau moyen de la mer) le long du trajet selon le grand cercle. Dans la mesure du possible, la distance entre les points du profil doit bien rendre compte des caractéristiques particulières du terrain. Un pas compris entre 30 m et 1 km est en principe approprié. En règle générale, il convient d'utiliser des pas plus longs pour des trajets plus longs. 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. Les équations suivantes tiennent, si

nécessaire, compte de la courbure de la Terre, en utilisant pour celle-ci le rayon a_e donné par l'équation (6a).

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. 14 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 14
Exemple d'un profil de trajet (transhorizon)



Note 1 – La valeur θ_r ainsi représentée est négative.

0452-14

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	Pour un trajet transhorizon, angle d'élévation de l'horizon (par rapport à l'horizontale locale) (mrad), mesuré à partir de l'antenne de la station brouilleuse. Pour un trajet en LoS, angle d'élévation de l'antenne de la station brouillée
θ_r	Pour un trajet transhorizon, angle d'élévation de l'horizon (par rapport à l'horizontale locale) (mrad), mesuré à partir de l'antenne de la station brouillée. Pour un trajet en LoS, angle d'élévation de l'antenne de la station brouilleuse
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

La longueur du trajet peut être obtenue, selon la géométrie du grand cercle, d'après les coordonnées géographiques des stations brouilleuses (φ_t, ψ_t) et brouillées (φ_r, ψ_r). En général, la longueur du trajet, d (km), peut être obtenue à partir des données du profil du trajet par:

$$d = \sum_{i=1}^n (d_i - d_{i-1}) \quad \text{km} \quad (138)$$

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

$$d = n \cdot d_{ii} \quad \text{km} \quad (139)$$

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

4 Classification des trajets

La classification entre trajet en LoS et trajet transhorizon n'est nécessaire qu'aux fins de la détermination des distances d_{lt} et d_{lr} , ainsi que des angles d'élévation θ_t et θ_r (voir ci-dessous).

Le profil du trajet doit être utilisé pour déterminer si le trajet est du type en LoS ou du type transhorizon, en se fondant sur la valeur médiane du rayon terrestre équivalent a_e , donnée par l'équation (6a).

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:

$$\theta_{max} > \theta_{td} \quad \text{mrad} \quad (140)$$

où:

$$\theta_{max} = \max_{i=1}^{n-1} (\theta_i) \quad \text{mrad} \quad (141)$$

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

$$\theta_i = \frac{h_i - h_{ts}}{d_i} - \frac{10^3 d_i}{2 a_e} \quad \text{mrad} \quad (142)$$

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)

$$\theta_{td} = \frac{h_{rs} - h_{ts}}{d} - \frac{10^3 d}{2 a_e} \quad \text{mrad} \quad (143)$$

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 (6a)).

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 (141) appliquée à $n - 1$ hauteurs de profil de terrain.

$$\theta_t = \theta_{max} \quad \text{mrad} \quad (144)$$

θ_{max} étant déterminé comme dans l'équation (141).

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

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 (141).

$$d_{li} = d_i \quad \text{km} \quad \text{pour max } (\theta_i) \quad (145)$$

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 (141) appliquée à $n - 1$ hauteurs de profil de terrain.

$$\theta_r = \max_{j=1}^{n-1} (\theta_j) \quad \text{mrad} \quad (146)$$

$$\theta_j = \frac{h_j - h_{rs}}{d - d_j} - \frac{10^3 (d - d_j)}{2 a_e} \quad \text{mrad} \quad (147)$$

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 (141).

$$d_{lr} = d - d_j \quad \text{km} \quad \text{pour max } (\theta_j) \quad (148)$$

5.1.5 Distance angulaire, θ (mrad)

$$\theta = \frac{10^3 d}{a_e} + \theta_t + \theta_r \quad \text{mrad} \quad (149)$$

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:

$$h_{st} = h_{st} + m \cdot d_i \quad \text{m} \quad (150)$$

où:

h_{st} : 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 (151a) et (152a) peuvent être utilisées si les points du profil sont espacés régulièrement. Les équations (151b) et (152b), 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:

$$m = \frac{\sum_{i=0}^n (h_i - h_a) \left(d_i - \frac{d}{2} \right)}{\sum_{i=0}^n \left(d_i - \frac{d}{2} \right)^2} \quad \text{m/km} \quad (151a)$$

Pour tout autre profil:

$$m = \left(\frac{1}{d^3} \right) \sum_{i=1}^n 3 (d_i - d_{i-1}) (d_i + d_{i-1} - d) (h_i + h_{i-1} - 2h_a) + (d_i - d_{i-1})^2 (h_i - h_{i-1}) \quad \text{m/km} \quad (151b)$$

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:

$$h_a = \frac{1}{n+1} \sum_{i=0}^n h_i \quad \text{m} \quad (152a)$$

Pour tout autre profil, une moyenne pondérée est calculée:

$$h_a = \left(\frac{1}{2d} \right) \sum_{i=1}^n (d_i - d_{i-1}) (h_i + h_{i-1}) \quad \text{m} \quad (152b)$$

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

$$h_{st} = h_a - m \frac{d}{2} \quad \text{m} \quad (153)$$

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:

$$h_{sr} = h_{st} + m \cdot d \quad \text{m} \quad (154)$$

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

$$h_{st} = \min(h_{st}, h_0) \quad \text{m} \quad (155a)$$

$$h_{sr} = \min(h_{sr}, h_n) \quad \text{m} \quad (155b)$$

Si l'une de ces deux hauteurs ou les deux ont dû être corrigées à l'aide des équations (155a) ou (155b), il faut également corriger la valeur de la pente m par la formule:

$$m = \frac{h_{sr} - h_{st}}{d} \quad \text{m/km} \quad (156)$$

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:

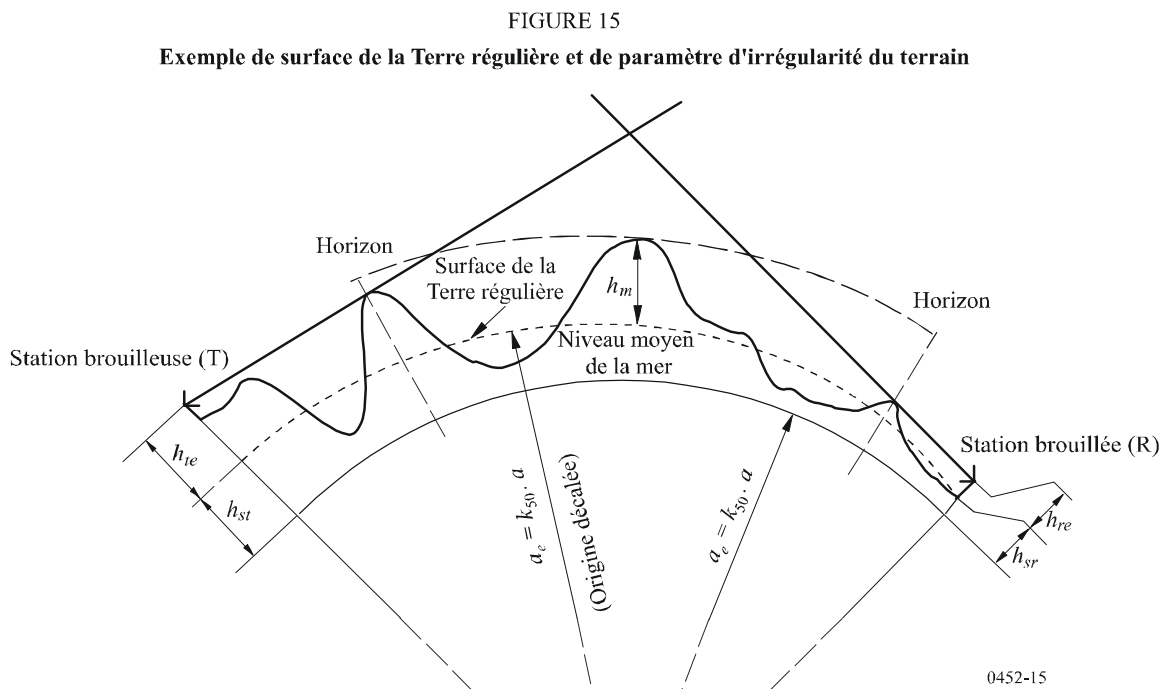
$$h_m = \max_{i=i_{lr}}^{i=i_{lt}} [h_i - (h_{st} + m \cdot d_i)] \quad \text{m} \quad (157)$$

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. 15.



Appendice 3 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 (31b). 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:

$$I(x) = \xi(x) - T(x) \quad (158)$$

où:

$$T(x) = \sqrt{[-2 \ln(x)]} \quad (158a)$$

$$\xi(x) = \frac{[(C_2 \cdot T(x) + C_1) \cdot T(x)] + C_0}{[(D_3 \cdot T(x) + D_2) T(x) + D_1] T(x) + 1} \quad (158b)$$

$$C_0 = 2,515516698 \quad (158c)$$

$$C_1 = 0,802853 \quad (158d)$$

$$C_2 = 0,010328 \quad (158e)$$

$$D_1 = 1,432788 \quad (158f)$$

$$D_2 = 0,189269 \quad (158g)$$

$$D_3 = 0,001308 \quad (158h)$$
