

Recommandation UIT-R P.452-18

(08/2023)

Série P: Propagation des ondes radioélectriques

Méthode de prédiction pour évaluer les brouillages entre stations situées à la surface de la Terre à des fréquences supérieures à 100 MHz environ

Avant-propos

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

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

Politique en matière de droits de propriété intellectuelle (IPR)

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

Séries des Recommandations UIT-R

(Également disponible en ligne: <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	Émissions de fréquences étalon et de signaux horaires
V	Vocabulaire et sujets associés

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

Publication électronique
Genève, 2024

© UIT 2024

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.452-18

Méthode de prévision pour évaluer les brouillages entre stations situées à la surface de la Terre à des fréquences supérieures à 100 MHz environ

(Question UIT-R 208/3)

(1970-1974-1978-1982-1986-1992-1994-1995-1997-1999-2001-2003-2005-2007-2009-2013-2015-2021-2023)

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 comprises entre environ 100 MHz et 50 GHz, compte tenu des brouillages par temps clair ou dus à la diffusion par les hydrométéores.

Mots clés

Brouillage, phénomène de conduit, diffusion troposphérique, diffraction, diffusion par les hydrométéores, produits de données numériques

Abréviations/Glossaire

amsl au-dessus du niveau moyen de la mer (*above mean sea level*)
IDWM carte mondiale numérisée de l'UIT (*ITU digitized world map*)
LoS visibilité directe (*line-of-sight*)

Recommandations de l'UIT

Recommandation UIT-R S.465
Recommandation UIT-R S.580
Recommandation UIT-R P.676
Recommandation UIT-R F.699
Recommandation UIT-R P.837
Recommandation UIT-R P.838
Recommandation UIT-R P.839
Recommandation UIT-R P.1058
Recommandation UIT-R P.1144
Recommandation UIT-R F.1245
Recommandation UIT-R F.1336

NOTE – Il convient d'utiliser la version la plus récente de la Recommandation.

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 des brouillages qui soient précises, fiables d'utilisation et acceptables par toutes les parties concernées;
- c) qu'il est souvent nécessaire que les prévisions de la propagation utilisées dans les méthodes de prévision des brouillages répondent aux objectifs de qualité de fonctionnement et de disponibilité pendant le «mois le plus défavorable»;
- d) qu'il faut que les méthodes de prévision s'appliquent à tous les types de trajets dans toutes les régions du monde,

recommande

d'utiliser la méthode de prévision des brouillages, présentée dans l'Annexe 1, pour évaluer l'affaiblissement de propagation à utiliser sur les trajets des signaux brouilleurs entre stations à la surface de la Terre, aux fréquences supérieures à environ 100 MHz.

Annexe 1

TABLE DES MATIÈRES

	Page
1 Introduction	4
2 Mécanismes de propagation des brouillages	4
3 Prévision des brouillages par temps clair	7
3.1 Remarques générales	7
3.2 Élaboration d'une prévision	7
4 Modèles de propagation par temps clair	13
4.1 Propagation en visibilité directe (comprenant les effets à court terme)	14
4.2 Diffraction.....	14
4.3 Diffusion troposphérique	21
4.4 Phénomène de conduit/réflexion sur les couches	22
4.5 Prévision globale	24
4.6 Calcul de l'affaiblissement de transmission.....	25
5 Prévision des brouillages dus à la diffusion par les hydrométéores	27
5.1 Principe théorique de l'affaiblissement de transmission dû à la diffusion par les hydrométéores.....	28
5.2 Paramètres d'entrée du modèle	29
5.3 Étapes de l'application de l'algorithme de diffusion par les hydrométéores.....	32
Pièce jointe 1 à l'Annexe 1 – Données radiométéorologiques nécessaires dans la procédure de prévision par temps clair.....	46
1 Introduction	46
2 Cartes donnant la variation verticale des données du coïndice et le coïndice à la surface de la Terre.....	46
Pièce jointe 2 à l'Annexe 1 – Analyse du profil du trajet.....	46
1 Introduction	46
2 Établissement du profil du trajet.....	47
3 Longueur du trajet	49
4 Classification des trajets	49
5 Calcul des paramètres à partir de l'analyse du profil du trajet.....	50
5.1 Trajets transhorizon et trajets LoS.....	50
Pièce jointe 3 à l'Annexe 1 – Approximation de la fonction de distribution normale cumulative inverse pour $x \leq 0,5$	55

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 modèles et des prévisions de la propagation 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.

Les modèles figurant dans la présente Recommandation reposent sur l'hypothèse selon laquelle l'émetteur brouilleur et le récepteur brouillé fonctionnent tous les deux dans la couche de surface de l'atmosphère. L'utilisation de hauteurs d'antenne exceptionnellement grandes pour modéliser des systèmes tels que les systèmes aéronautiques ne convient pas dans ces modèles. La méthode de prévision a été testée pour les stations radioélectriques fonctionnant à des fréquences comprises entre environ 0,1 GHz et 50 GHz.

Les modèles figurant dans la présente Recommandation sont conçus pour calculer les affaiblissements de propagation qui ne sont pas dépassés pendant des pourcentages de temps compris dans l'intervalle $0,001 \leq p \leq 50\%$. Cette hypothèse n'implique pas que l'affaiblissement sera maximal pour $p = 50\%$.

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.

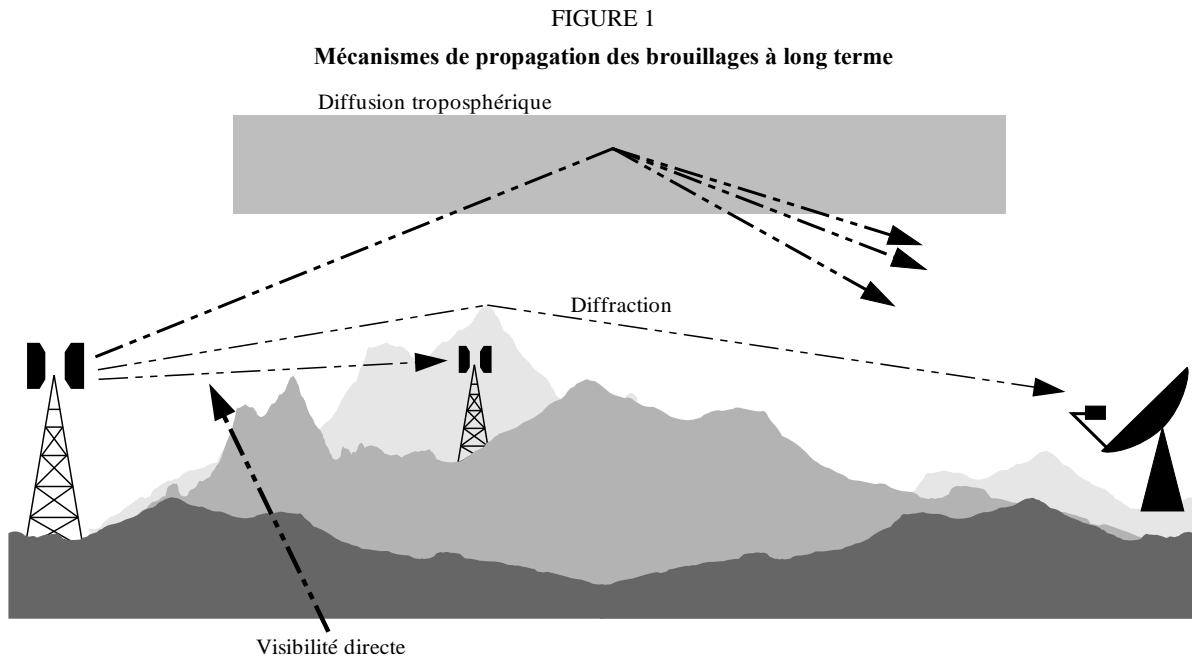
2 Mécanismes de propagation des brouillages

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), terrain irrégulier (non structuré) ou groupe(s) d'obstacles.

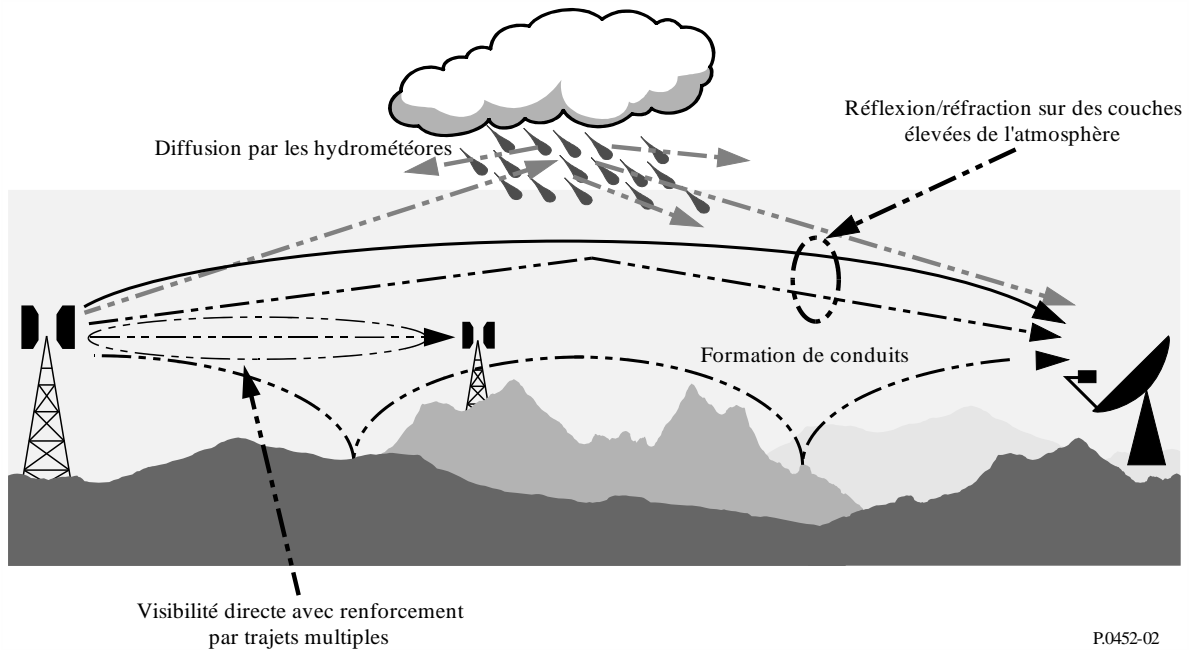
- *Diffusion troposphérique* (Fig. 1): Ce mécanisme définit le niveau de brouillage ambiant pour de longs trajets (par exemple, plus de 100-150 km), sur lesquels le champ de diffraction devient très faible. Cependant, sauf dans un petit nombre de cas particuliers mettant en jeu des récepteurs à grande 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 propagation à court terme le plus important qui peut occasionner des brouillages 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)



P.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 quatre 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, groupe d'obstacles et sous-trajets);
- *diffusion troposphérique*;
- *propagation anormale* (formation de conduits et réflexion/réfraction dans les couches).

3.2 Élaboration 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:

Étape 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)
Pol	Sans objet	Signal, par exemple vertical ou horizontal

NOTE 1 – Pour les stations brouilleuse et brouillée:

t : brouilleuse

r : brouillée.

La polarisation dont il est question dans le Tableau 1 n'est pas un paramètre à valeur numérique. Les informations sont utilisées au § 4.2.2.1 en lien avec les formules (30a), (30b) et (31).

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

Le choix entre une prévision pour l'année ou pour le «mois le plus défavorable» est généralement dicté par les objectifs de qualité (qualité de fonctionnement, disponibilité) du système radioélectrique brouillé à l'extrémité réceptrice du trajet de brouillage. Étant 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:

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

où:

ω : fraction du trajet située au-dessus des étendues d'eau (voir le Tableau 4).

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

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

À 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 %.

Étape 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 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. 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 la 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. Le calcul relatif au trajet de diffusion est fondé sur une géométrie de trajet déterminée par les valeurs annuelles de ΔN ou par les valeurs de ce paramètre correspondant au mois le plus défavorable; pour cette raison, il est inutile de considérer aussi les valeurs de N_0 pour le mois le plus défavorable. Les valeurs correctes

de ΔN et N_0 sont celles qui correspondent au point milieu du trajet et qui sont données par les cartes appropriées.

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

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

où:

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

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

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

où la valeur de μ_1 doit être ≤ 1 ,

avec:

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

où:

d_{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.

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

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 7 800 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 7 800 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, les calculs de cette procédure devraient être effectués sur la base de la Carte mondiale numérisée de l'UIT (IDWM), qui est disponible auprès du BR. Si tous les points sur le trajet sont situés au moins à 50 km de la mer ou d'autres vastes étendues d'eau, seule la catégorie «Zone de terre» s'applique.

Si les informations relatives à la zone sont stockées en points successifs le long du trajet radioélectrique, il faut prendre comme hypothèse que des changements peuvent intervenir à mi-chemin entre des points ayant des codes de zone différents.

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 $a = 6371$ km comme rayon terrestre physique moyen, on a pour la valeur médiane du rayon terrestre équivalent, a_e :

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

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

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

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

Un rayon terrestre équivalent général, a_p , défini comme étant égal à a_e pendant 50% du temps et à a_β pendant $\beta_0\%$ du temps, sera utilisé aux § 4.2.1 et 4.2.2.

Étape 4: Profil du trajet radioélectrique

Les profils de trajectoire utilisés dans la méthode décrite ci-dessous nécessitent des données spécifiques à la trajectoire pour les catégories de terrain (terre nue) et d'obstacles (couverture de terrain) le long de la trajectoire. La méthode comprend:

- la construction d'un profil de terrain en utilisant les hauteurs réelles du terrain;
- en fonction des catégories de groupes d'obstacles, l'ajout de hauteurs d'obstacles représentatives au profil du terrain.

Si cette méthode est utilisée pour calculer la perte par diffraction en utilisant le profil du terrain sans obstacle, la perte par diffraction sera sous-estimée dans les environnements comportant de nombreux obstacles, contrairement à la représentation combinée du terrain et des obstacles. Cette méthode a été élaborée et validée sur des données numériques de terrain, en combinant les données numériques de terrain avec des catégories d'obstacles statistiquement représentatives, par opposition à l'utilisation directe des données de hauteur de surface, où les hauteurs incluent les obstacles sans distinction explicite entre le terrain et les obstacles. Il est important de noter que la perte par diffraction peut être surestimée si les profils de terrain incluent des données de hauteur de surface. Si des données précises sur la hauteur de la surface sont disponibles, d'autres techniques telles que le tracé de rayon tridimensionnel, qui inclurait l'effet de la diffraction autour des bâtiments, pourraient être explorées pour arriver à une estimation plus précise des pertes de propagation.

Il est nécessaire de disposer d'un profil de terrain du trajet radioélectrique pour appliquer la méthode de prévision de la propagation. Le profil devrait contenir des informations sur les hauteurs de terrain (terre nue) et les hauteurs du groupe d'obstacles (couverture de terrain) tout au long du trajet.

Il convient de stocker les informations dans trois ensembles ayant le même nombre de valeurs, $n + 1$, comme suit:

$$d_i: \text{distance du } i\text{-ème point du profil depuis l'émetteur (km)} \quad (6c)$$

$$h_i: \text{hauteur du terrain du } i\text{-ème point du profil au-dessus du niveau de la mer (m)} \quad (6d)$$

$$g_i = \begin{cases} h_i + \text{hauteur représentative du groupe d'obstacles pour le } i\text{-ème point du profil (m)} & \text{pour } i = 1, \dots, n - 1 \\ h_0 & \text{pour } i = 0 \\ h_n & \text{pour } i = n \end{cases} \quad (6e)$$

où:

i : 0,1, 2, ..., n = indice du point du profil

$n + 1$: nombre de points du profil.

Il doit y avoir au moins un point du profil intermédiaire entre l'émetteur et le récepteur. Pour ce faire, il faut que $n \geq 2$. Un petit nombre de points convient uniquement pour des trajets courts de moins de 1 km.

Il est à noter que le premier point du profil se situe à l'emplacement de l'émetteur. Par conséquent, d_0 est égal à zéro et h_0 est la hauteur du terrain à l'emplacement de l'émetteur, en mètres, au-dessus du niveau de la mer. De même, le n -ième point du profil se situe à l'emplacement du récepteur. Par conséquent, d_n est la longueur du trajet en km et h_n est la hauteur du terrain à l'emplacement du récepteur, en mètres, au-dessus du niveau de la mer.

Aucune distance précise entre les points du profil n'est donnée. Si l'on prend comme hypothèse que les profils sont extraits d'ensembles de données d'élévation du terrain et de couverture au sol (obstacles) numériques, l'espacement approprié entre les points sera, en règle générale, analogue à l'espacement entre les points dans les ensembles de données source de résolution similaire les uns aux autres. Il n'est pas nécessaire que les points du profil soient équidistants les uns des autres mais

il est souhaitable que l'espacement soit plus ou moins le même pour l'ensemble du profil et non inférieur à l'ordre de 30 m.

Les réseaux utilisés pour les calculs comprennent les distances, d_i , les hauteurs du terrain, h_i , telles que données par l'équation (6d) et les hauteurs du terrain avec les hauteurs représentatives des obstacles ajoutées, g_i , telles que données par l'équation (6e). La hauteur représentative des obstacles ne doit pas être ajoutée aux hauteurs du terrain à l'émetteur et au récepteur, dans le cas où la distance depuis l'émetteur ou le récepteur est inférieure à 50 m. Ainsi, g_0 est la hauteur du terrain à l'émetteur en mètres au-dessus du niveau de la mer, g_n est la hauteur du terrain au récepteur en mètres au-dessus du niveau de la mer et g_i est la hauteur du terrain en mètres au-dessus du niveau de la mer pour tous les points situés à une distance de l'émetteur ou du récepteur inférieure à 50 m.

La «hauteur représentative du groupe d'obstacles» utilisée dans l'équation (6e) se rapporte à des informations statistiques relatives à la hauteur associées à la classification de la couverture au sol, par exemple végétation ou bâtiments, c'est-à-dire une valeur unique de la hauteur attribuée à chaque classe de végétation/d'obstacle. On ajoute des hauteurs représentatives d'obstacles à un profil car on part du principe que les hauteurs h_i correspondent à la surface nue de la Terre. Si le trajet radioélectrique traverse une zone boisée ou urbanisée ou il y a diffraction ou obstruction sur le sous trajet, la hauteur effective du profil sera en général plus élevée car le signal radioélectrique se propagera au-dessus de l'obstacle. On peut donc obtenir une représentation plus adéquate du profil en ajoutant des hauteurs représentatives afin de tenir compte des obstacles.

La hauteur ajoutée n'est pas nécessairement une hauteur physique, par exemple la hauteur des toits dans le cas de bâtiments. En raison des vides entre les obstacles, une certaine quantité d'énergie de l'onde radioélectrique peut se propager entre les obstacles et non au-dessus d'eux. En pareil cas, la présence d'obstacles devrait accroître l'affaiblissement de diffraction, sans pour autant que la hauteur du profil atteigne la hauteur physique des obstacles.

Cela est vrai en particulier pour les zones urbaines à bâtiments élevés. Dans les zones relevant de la catégorie des zones urbaines denses ou des zones urbaines à bâtiments élevés, les bâtiments ont en général 30 mètres de hauteur, voire plus. Or, dans certaines de ces zones il peut y avoir de grands espaces entre ces immeubles et il est possible que des trajets à faible affaiblissement passent autour de ces bâtiments et non au-dessus des toits. Des valeurs plus petites des hauteurs représentatives plutôt que les hauteurs physiques des obstacles peuvent être appropriées dans de tels cas.

À l'autre extrême, même dans les zones classées comme zones dégagées ou zones rurales, il est rare que le sol soit complètement nu, c'est à dire qu'il n'y ait aucun objet susceptible de faire augmenter l'affaiblissement de propagation. Dans de nombreux cas, il serait plus indiqué de prendre de petites valeurs des hauteurs représentatives et non une valeur nulle.

Ainsi, la hauteur représentative du groupe d'obstacles R , dépend non seulement de la hauteur physique type des obstacles mais aussi de l'espacement dans le plan horizontal entre les objets et des vides entre ces objets. Il n'y a pas de norme acceptée permettant de dire ce qu'une catégorie d'obstacles, par exemple la catégorie «urbaine», représente en termes physiques dans différents pays. Lorsqu'elles sont disponibles, il conviendrait d'utiliser les informations relatives à la hauteur représentative des obstacles locaux basées sur des statistiques ou provenant d'autres sources; le Tableau 3) donne des valeurs par défaut des hauteurs représentatives des obstacles qui peuvent être utilisées si l'on ne dispose pas d'informations plus précises pour la région, le pays concerné(e).

TABLEAU 3

Valeurs par défaut de la hauteur représentative des obstacles

Catégorie d'obstacles	Hauteur représentative des obstacles (m)
	Ajouter au profil de l'équation (6e) pour $i = 1$ à $n - 1$
Eau/mer	0
Zone dégagée/rurale	0
Zone suburbaine	10
Zone urbaine/boisée/forêt	15
Zone urbaine dense	20

Les valeurs de certains paramètres relatifs au trajet qui sont nécessaires pour les calculs (voir le Tableau 4) 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 la Pièce jointe 2 à l'Annexe 1.

TABLEAU 4

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}	Distance entre les antennes d'émission et de réception et leurs horizons respectifs (km).
θ_t, 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 en direction 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) pour le modèle de propagation par conduits/réflexion sur des couches (voir les définitions dans la Pièce jointe 2 de l'Annexe 1). On notera que les mêmes noms de paramètres sont utilisés pour les hauteurs équivalentes dans le modèle de diffraction, mais que h_{te} et h_{re} ont des définitions différentes dans le modèle de diffraction. Voir les équations (39a) et (39b).
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 (134). 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:

$$L_{bfs_g} = 92,4 + 20 \log_{10} f + 20 \log_{10} d_{fs} + A_g(d_{fs}) \quad \text{dB} \quad (8)$$

où:

f : fréquence (GHz)

d_{fs} : distance entre les antennes d'émission et de réception et leurs horizons respectifs (km):

$$d_{fs} = \sqrt{d^2 + \left(\frac{h_{ts} - h_{rs}}{1000}\right)^2} \quad (8a)$$

d : longueur du trajet le long du grand cercle (km)

h_{ts} : hauteur de l'antenne de transmission au-dessus du niveau de la mer (m)

h_{rs} : hauteur de l'antenne de réception au-dessus du niveau de la mer (m)

A_g : absorption totale par les gaz (dB):

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

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 :

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

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

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 (que le trajet soit ou non véritablement un trajet 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 coindice 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.

Cela étant, dans le cas général où $p < 50\%$, le calcul de l'affaiblissement dû à la diffraction doit être effectué deux fois, d'abord pour la valeur médiane du facteur multiplicatif du rayon terrestre équivalent k_{50} (formule (5)) et ensuite pour la valeur limite du facteur multiplicatif du rayon terrestre équivalent k_{β} égale à 3. Le second calcul permet d'obtenir une estimation de l'affaiblissement dû à la diffraction qui n'est pas dépassé pendant $\beta_0\%$ du temps, où β_0 est donné par la formule (2).

L'affaiblissement dû à la diffraction L_{dp} qui n'est pas dépassé pendant $p\%$ du temps, pour $0,001\% \leq p \leq 50\%$, est ensuite calculé à l'aide de la procédure de limitation ou d'interpolation décrite au § 4.2.4.

Le modèle de diffraction calcule les valeurs suivantes demandées au § 4.5:

- 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.

On calcule l'affaiblissement de diffraction en combinant une méthode basée sur la construction de Bullington et la diffraction dans le cas d'une Terre sphérique. La partie de Bullington de la méthode est un prolongement de la construction de Bullington de base utilisée pour gérer la transition entre des conditions de propagation en espace libre et des conditions de propagation avec obstacles. Cette partie de la méthode est utilisée deux fois: pour le profil du trajet effectif et pour un profil régulier (hauteur nulle) avec des hauteurs d'antenne modifiées appelées hauteurs équivalentes d'antenne. Les mêmes hauteurs équivalentes d'antenne sont également utilisées pour calculer l'affaiblissement de diffraction pour une Terre sphérique. On obtient le résultat final en combinant les trois affaiblissements calculés comme indiqué ci-dessus. Pour un trajet entièrement régulier, l'affaiblissement de diffraction final sera le résultat obtenu avec le modèle de Terre sphérique.

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), indépendamment de la configuration du terrain (régulier ou irrégulier) et qu'il s'agisse d'un trajet en visibilité directe ou transhorizon.

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:

$$J(v) = 6,9 + 20 \log_{10} \left(\sqrt{(v - 0,1)^2 + 1} + v - 0,1 \right) \quad (13)$$

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 $v < -0,78$.

Le calcul de la diffraction globale est décrit dans les paragraphes qui suivent:

La Section 4.2.1 décrit la partie de Bullington de la méthode de calcul de la diffraction. Pour chaque calcul de la diffraction, pour un rayon terrestre équivalent donné, cette méthode est utilisée deux fois. La deuxième fois, les hauteurs d'antenne sont modifiées et toutes les hauteurs de profil sont nulles.

La Section 4.2.2 décrit la partie Terre sphérique du modèle de diffraction. On utilise les mêmes hauteurs d'antenne que celles utilisées la deuxième fois dans la partie de Bullington (§ 4.2.1).

La Section 4.2.3 décrit comment les méthodes des § 4.2.1 et 4.2.2 sont utilisées conjointement pour effectuer les calculs de diffraction complets pour un rayon terrestre équivalent donné. Compte tenu

de la manière dont les parties Bullington et Terre sphérique de la méthode sont utilisées, les calculs complets sont connus sous le nom de modèle «delta Bullington».

La Section 4.2.4 décrit les calculs complets pour un affaiblissement de diffraction non dépassé pendant un pourcentage de temps $p\%$ donné.

4.2.1 Partie de Bullington du calcul de la diffraction

Dans les formules qui suivent, les pentes sont calculées en m/km par rapport à la ligne de base joignant le niveau de la mer au niveau de l'émetteur et le niveau de la mer au niveau du récepteur. La distance et la hauteur (y compris la hauteur représentative du groupe d'obstacles) du i -ème point du profil sont respectivement d_i en kilomètres et g_i en mètres au-dessus du niveau moyen de la mer; i prend des valeurs comprises entre 1 et n où $n + 1$ est le nombre de points du profil et la longueur totale du trajet est d kilomètres. Par commodité, les terminaux situés au début et à la fin du profil sont appelés émetteur et récepteur. Leur hauteur en mètres au-dessus du niveau de la mer est respectivement h_{ts} et h_{rs} . La courbure équivalente de la Terre, $C_e \text{ km}^{-1}$ est donnée par $1/a_p$, où a_p est le rayon terrestre équivalent en kilomètres. La longueur d'onde en mètres est représentée par λ . Les valeurs à utiliser pour a_p sont indiquées dans le § 4.2.4.

Une attention particulière est nécessaire à proximité des terminaux pour faire en sorte que l'ajout de hauteurs représentatives de groupes d'obstacles locaux n'entraîne pas une augmentation irréaliste des angles d'élévation de l'horizon, tels qu'ils sont vus par chaque antenne.

Trouver le point du profil intermédiaire pour lequel la pente de la droite joignant l'émetteur à ce point est la plus forte.

$$S_{tim} = \max \left[\frac{g_i + 500C_e d_i (d - d_i) - h_{ts}}{d_i} \right] \quad \text{m/km} \quad (14)$$

où l'indice du profil i prend des valeurs allant de 1 à $n - 1$.

Calculer la pente de la droite joignant l'émetteur au récepteur dans l'hypothèse d'un trajet en visibilité directe:

$$S_{tr} = \frac{h_{rs} - h_{ts}}{d} \quad \text{m/km} \quad (15)$$

Deux cas doivent maintenant être examinés.

Cas 1: le trajet est un trajet en visibilité directe

Si $S_{tim} < S_{tr}$, le trajet est un trajet en visibilité directe.

Trouver le point du profil intermédiaire pour lequel la valeur du paramètre de diffraction v est la plus élevée:

$$v_{\max} = \max \left\{ \left[g_i + 500C_e d_i (d - d_i) - \frac{h_{ts}(d - d_i) + h_{rs}d_i}{d} \right] \sqrt{\frac{0,002d}{\lambda d_i (d - d_i)}} \right\} \quad (16)$$

où l'indice du profil i prend des valeurs allant de 1 à $n - 1$.

Dans ce cas, l'affaiblissement sur une arête en lame de couteau, au point de Bullington, est donné par:

$$L_{uc} = J(v_{\max}) \quad \text{dB} \quad (17)$$

où la fonction J est donnée par la formule (13) pour v_b supérieur à $-0,78$ et est nulle dans les autres cas.

Cas 2: le trajet est un trajet transhorizon

Si $S_{tim} \geq S_{tr}$, le trajet est un trajet transhorizon.

Trouver le point du profil intermédiaire pour lequel la pente de la droite joignant le récepteur à ce point est la plus forte.

$$S_{rim} = \max \left[\frac{g_i + 500 C_e d_i (d - d_i) - h_{rs}}{d - d_i} \right] \quad \text{m/km} \quad (18)$$

où l'indice du profil i prend des valeurs allant de 1 à $n - 1$.

Calculer la distance séparant le point de Bullington de l'émetteur:

$$d_{bp} = \frac{h_{rs} - h_{ts} + S_{rim} d}{S_{tim} + S_{rim}} \quad \text{km} \quad (19)$$

Calculer le paramètre de diffraction, v_b , au point de Bullington:

$$v_b = \left[h_{ts} + S_{tim} d_{bp} - \frac{h_{rs}(d - d_{bp}) + h_{rs} d_{bp}}{d} \right] \sqrt{\frac{0,002d}{\lambda d_{bp}(d - d_{bp})}} \quad (20)$$

Dans ce cas, l'affaiblissement sur une arête en lame de couteau au point de Bullington est donné par:

$$L_{uc} = J(v_b) \quad \text{dB} \quad (21)$$

Pour L_{uc} calculé à l'aide de la formule (17) ou (21), l'affaiblissement de diffraction au point de Bullington pour le trajet est maintenant donné par:

$$L_{bull} = L_{uc} + [1 - \exp(-L_{uc}/6)](10 + 0,02 d) \quad \text{dB} \quad (22)$$

4.2.2 Affaiblissement de diffraction pour une Terre sphérique

L'affaiblissement de diffraction pour une Terre sphérique pour des hauteurs d'antenne h_{te} et h_{re} (m), L_{dsph} , est calculé comme suit:

Calculer la distance marginale en visibilité directe pour un trajet régulier:

$$d_{los} = \sqrt{2a_p} \cdot (\sqrt{0,001h_{te}} + \sqrt{0,001h_{re}}) \quad \text{km} \quad (23)$$

Les valeurs à utiliser pour a_p sont indiquées dans le § 4.2.4. Les hauteurs équivalentes d'antennes h_{te} et h_{re} sont définies dans les équations (39a) et (39b).

Si $d \geq d_{los}$, calculer l'affaiblissement de diffraction selon la méthode du § 4.2.2.1 ci-après pour $a_{dft} = a_p$ afin d'obtenir L_{dft} et prendre L_{dsph} égal à L_{dft} . Aucun autre calcul de diffraction pour une Terre sphérique n'est nécessaire.

Sinon continuer comme suit:

Calculer la plus petite valeur de la hauteur de dégagement entre le trajet suivant la courbure de la Terre et le rayon entre les antennes, h_{se} , donné par:

$$h_{se} = \frac{\left(h_{te} - 500 \frac{d_{se1}^2}{a_p} \right) d_{se2} + \left(h_{re} - 500 \frac{d_{se2}^2}{a_p} \right) d_{se1}}{d} \quad \text{m} \quad (24)$$

où:

$$d_{se1} = \frac{d}{2} (1 + b) \quad \text{km} \quad (25a)$$

$$d_{se2} = d - d_{se1} \quad \text{km} \quad (25b)$$

$$b = 2\sqrt{\frac{m+1}{3m}} \cos \left\{ \frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \arccos \left(\frac{3c}{2} \sqrt{\frac{3m}{(m+1)^3}} \right) \right\} \quad (25c)$$

où la fonction arccos donne un angle en radians.

$$c = \frac{h_{te} - h_{re}}{h_{te} + h_{re}} \quad (25d)$$

$$m = \frac{250d^2}{a_p (h_{te} + h_{re})} \quad (25e)$$

Calculer la hauteur de dégagement requise pour un affaiblissement de diffraction nul, h_{req} , donné par:

$$h_{req} = 17,456 \sqrt{\frac{d_{se1} \cdot d_{se2} \cdot \lambda}{d}} \quad \text{m} \quad (26)$$

Si $h_{se} > h_{req}$, l'affaiblissement de diffraction pour une Terre sphérique, L_{dsph} , est nul. Aucun autre calcul de diffraction pour une Terre sphérique n'est nécessaire.

Sinon continuer comme suit:

Calculer le rayon terrestre équivalent modifié, a_{em} , qui donne la visibilité directe marginale à la distance d comme suit:

$$a_{em} = 500 \left(\frac{d}{\sqrt{h_{te}} + \sqrt{h_{re}}} \right)^2 \quad \text{km} \quad (27)$$

Utiliser la méthode décrite au § 4.2.2.1 pour $a_{dft} = a_{em}$ afin d'obtenir L_{dft} .

Si L_{dft} est négative, l'affaiblissement de diffraction pour une Terre sphérique L_{dsph} est nul et aucun autre calcul de diffraction pour une Terre sphérique n'est nécessaire.

Sinon continuer comme suit:

Calculer l'affaiblissement de diffraction pour une Terre sphérique par interpolation:

$$L_{dsph} = \left[1 - h_{se} / h_{req} \right] L_{dft} \quad \text{dB} \quad (28)$$

4.2.2.1 Premier terme de l'affaiblissement de diffraction pour une Terre sphérique

On décrit dans ce paragraphe la méthode de calcul de la diffraction pour une Terre sphérique en utilisant uniquement le premier terme de la série des résidus. On l'inclut dans la méthode de calcul de la diffraction globale décrite au § 4.2.2 ci-dessus afin d'obtenir le premier terme de l'affaiblissement de diffraction L_{dft} pour une valeur donnée du rayon terrestre équivalent a_{dft} . La valeur de a_{dft} à utiliser est donnée au § 4.2.2.

Prendre les propriétés électriques du terrain types pour un trajet terrestre avec une permittivité relative $\epsilon_r = 22,0$ et une conductivité $\sigma = 0,003$ S/m et calculer L_{dft} à l'aide des formules (30) à (37). Le résultat obtenu est $L_{dftland}$.

Prendre les propriétés électriques du terrain type pour un trajet maritime, avec une permittivité relative $\epsilon_r = 80,0$ et une conductivité $\sigma = 5,0$ S/m et calculer L_{dft} à l'aide des formules (30) à (37). Le résultat obtenu est L_{dftsea} .

Le premier terme de l'affaiblissement de diffraction pour une Terre sphérique est maintenant donné par:

$$L_{dft} = \omega L_{dftsea} + (1 - \omega) L_{dftland} \quad \text{dB} \quad (29)$$

où ω est le tronçon du trajet au-dessus de la mer.

Début du calcul à effectuer deux fois comme indiqué ci-dessus:

Facteur normalisé d'admittance de surface pour une polarisation horizontale et une polarisation verticale:

$$K_H = 0,036 (a_{dft} f)^{-1/3} \left[(\varepsilon_r - 1)^2 + (18 \sigma / f)^2 \right]^{-1/4} \quad \text{(horizontale)} \quad (30a)$$

et

$$K_V = K_H \left[\varepsilon_r^2 + (18 \sigma / f)^2 \right]^{1/2} \quad \text{(verticale)} \quad (30b)$$

Si le vecteur de polarisation a une composante horizontale et une composante verticale, comme dans le cas de la polarisation circulaire ou oblique, décomposer le vecteur en composantes horizontale et verticale, calculer chacune des composantes séparément à partir des formules (30a) et (30b) et combiner les résultats en calculant une somme vectorielle du champ. Dans la pratique, cette décomposition sera généralement inutile car au-delà de 300 MHz, on peut utiliser une valeur de 1 pour β_{dft} dans la formule (31).

Calculer le paramètre sol terrestre/polarisation:

$$\beta_{dft} = \frac{1 + 1,6K^2 + 0,67K^4}{1 + 4,5K^2 + 1,53K^4} \quad (31)$$

où K vaut K_H ou K_V selon la polarisation.

Distance normalisée:

$$X = 21,88 \beta_{dft} \left(\frac{f}{a_{dft}^2} \right)^{1/3} d \quad (32)$$

Hauteurs normalisées de l'émetteur et du récepteur:

$$Y_t = 0,9575 \beta_{dft} \left(\frac{f^2}{a_{dft}} \right)^{1/3} h_{te} \quad (33a)$$

$$Y_r = 0,9575 \beta_{dft} \left(\frac{f^2}{a_{dft}} \right)^{1/3} h_{re} \quad (33b)$$

Calculer le terme de distance donné par:

$$F_X = \begin{cases} 11 + 10 \log_{10}(X) - 17,6X & \text{pour } X \geq 1,6 \\ -20 \log_{10}(X) - 5,6488X^{1,425} & \text{ou } X < 1,6 \end{cases} \quad (34)$$

Définir une fonction de hauteur normalisée donnée par:

$$G(Y_{t/r}) = \begin{cases} 17,6(B_{t/r} - 1,1)^{0,5} - 5 \log_{10}(B_{t/r} - 1,1) - 8 & \text{pour } B_{t/r} > 2 \\ 20 \log_{10}(B_{t/r} + 0,1B_{t/r}^3) & \text{dans les autres cas} \end{cases} \quad (35)$$

où:

$$B_t = \beta_{dft} Y_t \quad (36a)$$

$$B_r = \beta_{dft} Y_r \quad (36b)$$

Si $G(Y)$ est inférieur à $2 + 20 \log_{10} K$, prendre la valeur limite $G(Y) = 2 + 20 \log_{10} K$.

Le premier terme de l'affaiblissement de diffraction pour une Terre sphérique est maintenant donné par:

$$L_{dft} = -F_X - G(Y_t) - G(Y_r) \quad \text{dB} \quad (37)$$

4.2.3 Modèle complet d'affaiblissement dit «delta-Bullington»

Utiliser la méthode décrite au § 4.2.1 pour obtenir les hauteurs du profil du trajet (g_i) et les hauteurs d'antenne. Prendre l'affaiblissement de diffraction au point de Bullington résultant pour le trajet effectif, L_{bulla} égal à L_{bull} donné par la formule (22).

Utiliser la méthode décrite au § 4.2.1 une seconde fois, avec toutes les hauteurs du profil, g_i , mises à zéro et les hauteurs d'antenne modifiées données par:

$$h'_{ts} = h_{ts} - h_{std} \quad \text{m (amsl)} \quad (38a)$$

$$h'_{rs} = h_{rs} - h_{srd} \quad \text{m (amsl)} \quad (38b)$$

où les hauteurs, pour une Terre régulière, de l'émetteur et du récepteur, h_{std} et h_{srd} , sont données au § 5.1.6.3 de la Pièce jointe 2. Prendre l'affaiblissement de diffraction au point de Bullington résultant, pour ce trajet régulier, L_{bulls} égal à L_{bull} donné par la formule (22).

Utiliser la méthode décrite au § 4.2.2 pour calculer l'affaiblissement de diffraction pour une Terre sphérique L_{dsph} pour la longueur du trajet effectif d km et avec:

$$h_{te} = h'_{ts} \quad \text{m (amsl)} \quad (39a)$$

$$h_{re} = h'_{rs} \quad \text{m (amsl)} \quad (39b)$$

L'affaiblissement de diffraction pour le trajet général est maintenant donné par:

$$L_d = L_{bulla} + \max\{L_{dsph} - L_{bulls}, 0\} \quad \text{dB} \quad (40)$$

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

Utiliser la méthode décrite au § 4.2.3 pour calculer l'affaiblissement de diffraction L_d pour le rayon terrestre équivalent $a_p = a_e$ donné par la formule (6a). La valeur médiane de l'affaiblissement de diffraction L_{d50} est prise égale à L_d .

Si $p = 50\%$, l'affaiblissement de diffraction non dépassé pendant $p\%$ du temps, L_{dp} , est donné par L_{d50} , et les calculs de diffraction sont alors achevés.

Si $p < 50\%$, continuer comme suit.

Utiliser la méthode décrite au § 4.2.3 pour calculer l'affaiblissement de diffraction L_d pour le rayon terrestre équivalent $a_p = a_\beta$ donné par la formule (6b). L'affaiblissement de diffraction non dépassé pendant $\beta_0\%$ du temps $L_{d\beta}$ est pris égal à L_d .

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

$$F_i = \frac{I\left(\frac{p}{100}\right)}{I\left(\frac{\beta_0}{100}\right)} \quad \text{pour } 50\% > p > \beta_0\% \quad (41a)$$

$$= 1 \quad \text{pour } \beta_0\% \geq p \quad (41b)$$

où $I(x)$ est la fonction de distribution normale cumulative complémentaire inverse. La Pièce jointe 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:

$$L_{dp} = L_{d50} + F_i (L_{d\beta} - L_{d50}) \quad \text{dB} \quad (42)$$

où L_{d50} et $L_{d\beta}$ sont définis par les équations ci-dessus, et F_i est défini par les équations (41a) et (41b), 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:

$$L_{bd50} = L_{bfs} + L_{d50} \quad \text{dB} \quad (43)$$

où L_{bfs} 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:

$$L_{bd} = L_{b0p} + L_{dp} \quad \text{dB} \quad (44)$$

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

4.3 Diffusion troposphérique

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:

$$L_{bs} = 190 + L_f + 20 \log_{10} d + 0,573\theta - 0,15 N_0 + L_c + A_g - 10,1[-\log_{10} (p/50)]^{0,7} \text{ dB} \quad (45)$$

où:

L_f : affaiblissement en fonction de la fréquence:

$$L_f = 25 \log_{10} f - 2,5 [\log_{10} (f/2)]^2 \quad \text{dB} \quad (45a)$$

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

$$L_c = 0,051 \cdot e^{0,055(G_t + G_r)} \quad \text{dB} \quad (45b)$$

N_0 : réfractivité au sol ramené au niveau de la mer, à partir des cartes de la Pièce jointe 1 de l'Annexe 1

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):

$$L_{ba} = A_f + A_d(p) + A_g \quad \text{dB} \quad (46)$$

où:

A_f : valeur totale des affaiblissements fixes par couplage entre les antennes et la structure de la propagation anormale dans l'atmosphère:

$$A_f = 102,45 + 20 \log_{10} f + 20 \log_{10} (d_{lt} + d_{lr}) + A_{st} + A_{sr} + A_{ct} + A_{cr} \quad \text{dB} \quad (47)$$

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

$$A_{lf}(f) = 45,375 - 137,0 \cdot f + 92,5 \cdot f^2 \quad \text{dB} \quad \text{si } f < 0,5 \text{ GHz} \quad (47a)$$

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

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:

$$A_{st, sr} = \begin{cases} 20 \log_{10} \left[1 + 0,361 \theta''_{t,r} (f \cdot d_{lt,lr})^{1/2} \right] + 0,264 \theta''_{t,r} f^{1/3} & \text{dB pour } \theta''_{t,r} > 0 \text{ mrad} \\ 0 & \text{dB pour } \theta''_{t,r} \leq 0 \text{ mrad} \end{cases} \quad (48)$$

où:

$$\theta''_{t,r} = \theta_{t,r} - 0,1 d_{lt,lr} \quad \text{mrad} \quad (48a)$$

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:

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

$$d_{ct, cr} \leq d_{lt, lr} \quad (49)$$

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

$$A_{ct, cr} = 0 \quad \text{dB} \quad \text{dans tous les autres cas} \quad (49a)$$

Il convient de noter le domaine limité de conditions pour lequel l'équation (49) 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:

$$A_d(p) = \gamma_d \cdot \theta' + A(p) \quad \text{dB} \quad (50)$$

où:

γ_d : affaiblissement linéique:

$$\gamma_d = 5 \times 10^{-5} a_e f^{1/3} \quad \text{dB/mrad} \quad (51)$$

θ' : distance angulaire (corrigée, le cas échéant à l'aide de l'équation (52a)), pour permettre l'application du modèle d'effet d'écran du terrain de l'équation (48):

$$\theta' = \frac{10^3 d}{a_e} + \theta'_t + \theta'_r \quad \text{mrad} \quad (52)$$

$$\theta'_{t,r} = \begin{cases} \theta_{t,r} & \text{pour } \theta_{t,r} \leq 0,1 d_{lt,lr} \quad \text{mrad} \\ 0,1 d_{lt,lr} & \text{pour } \theta_{t,r} > 0,1 d_{lt,lr} \quad \text{mrad} \end{cases} \quad (52a)$$

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

$$A(p) = -12 + (1,2 + 3,7 \times 10^{-3} d) \log_{10} \left(\frac{p}{\beta} \right) + 12 \left(\frac{p}{\beta} \right)^\Gamma \quad (53)$$

$$\Gamma = \frac{1,076}{(2,0058 - \log_{10} \beta)^{1,012}} \times e^{-(9,51 - 4,8 \log_{10} \beta + 0,198 (\log_{10} \beta)^2) \times 10^{-6} \cdot d^{1,13}} \quad (53a)$$

$$\beta = \beta_0 \cdot \mu_2 \cdot \mu_3 \quad \% \quad (54)$$

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

$$\mu_2 = \left[\frac{500}{a_e} \frac{d^2}{(\sqrt{h_{te}} + \sqrt{h_{re}})^2} \right]^\alpha \quad (55)$$

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

Les hauteurs équivalentes des antennes h_{te} et h_{re} sont définies dans l'équation (156).

$$\alpha = -0,6 - \varepsilon \cdot 10^{-9} \cdot d^{3,1} \cdot \tau \quad (55a)$$

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:

$$\mu_3 = \begin{cases} 1 & \text{pour } h_m \leq 10 \text{ m} \\ \exp \left[-4,6 \times 10^{-5} (h_m - 10) (43 + 6d_i) \right] & \text{pour } h_m > 10 \text{ m} \end{cases} \quad (56)$$

$$d_l = \min (d - d_{lt} - d_{lr}, 40) \quad \text{km} \quad (57)$$

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 la Pièce jointe 2 de l'Annexe 1.

4.5 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 du paramètre de pente :

$$F_j = 1,0 - 0,5 \left(1,0 + \tanh \left(3,0 \xi \frac{(S_{tim} - S_{tr})}{\Theta} \right) \right) \quad (58)$$

où:

ξ : paramètre réglable défini actuellement comme étant égal à 0,8

$(S_{tim} - S_{tr})$: paramètres de pente définis dans les formules (14) et (15), à l'exception de l'utilisation de h_i au lieu de g_i dans l'équation (14)

Θ : paramètre réglable défini actuellement comme étant égal à 0,3 mrad.

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

$$F_k = 1,0 - 0,5 \left(1,0 + \text{th} \left(3,0 \kappa \frac{(d - d_{sw})}{d_{sw}} \right) \right) \quad (59)$$

où:

d : longueur du trajet le long du grand cercle (km) (définie dans le Tableau 4)

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.

$$L_{minb0p} = \begin{cases} L_{b0p} + (1 - \omega)L_{dp} & \text{pour } p < \beta_0 \\ L_{bd50} + (L_{b0\beta} + (1 - \omega)L_{dp} - L_{bd50}) \cdot F_i & \text{pour } p \geq \beta_0 \end{cases} \quad \text{dB} \quad (60)$$

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

F_i : facteur d'interpolation de la diffraction, donné par l'équation (41).

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:

$$L_{minbap} = \eta \ln \left(\exp\left(\frac{L_{ba}}{\eta}\right) + \exp\left(\frac{L_{b0p}}{\eta}\right) \right) \quad \text{dB} \quad (61)$$

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 (46)

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:

$$L_{bda} = \begin{cases} L_{bd} & \text{pour } L_{minbap} > L_{bd} \\ L_{minbap} + (L_{bd} - L_{minbap})F_k & \text{pour } L_{minbap} \leq L_{bd} \end{cases} \quad \text{dB} \quad (62)$$

où:

L_{bd} : affaiblissement de transmission de référence pour la diffraction non dépassé pendant $p\%$ du temps d'après l'équation (44)

F_k : facteur d'interpolation donné par l'équation (59) conformément à la valeur de la distance du trajet du grand cercle d .

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:

$$L_{bam} = L_{bda} + (L_{minb0p} - L_{bda})F_j \quad \text{dB} \quad (63)$$

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

$$L_b = -5 \log_{10}(10^{-0,2L_{bs}} + 10^{-0,2L_{bam}}) \quad \text{dB} \quad (64)$$

4.6 Calcul de l'affaiblissement de transmission

La méthode décrite aux § 4.1 à 4.5 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. Lorsque l'angle d'incidence des ondes radioélectriques est connu, le gain d'antenne dans la direction de l'angle d'incidence considéré peut être utilisé.

La procédure qui suit fournit une méthode pour le calcul de l'affaiblissement de transmission entre deux stations de Terre. Étape 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:

$$\delta = \arccos(\sin(\varphi_t) \sin(\varphi_r) + \cos(\varphi_t) \cos(\varphi_r) \cos(\psi_t - \psi_r)) \quad \text{rad} \quad (65)$$

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

$$d = 6371 \cdot \delta \quad \text{km} \quad (66)$$

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:

$$\alpha_{tr} = \arccos(\{\sin(\varphi_r) - \sin(\varphi_t) \cos(\delta)\} / \sin(\delta) \cos(\varphi_t)) \quad \text{rad} \quad (67)$$

Après avoir appliqué l'expression (67), si $\psi_t - \psi_r > 0$; alors:

$$\alpha_{tr} = 2\pi - \alpha_{tr} \text{ rad} \quad (68)$$

On calcule l'angle azimutal de la station r à la station t , α_{rt} , par symétrie à partir des équations (67) et (68).

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:

$$\varepsilon_{pt} = \frac{h_r - h_t}{d} - \frac{d}{2a_e} \quad \text{rad} \quad (69a)$$

et

$$\varepsilon_{pr} = \frac{h_t - h_r}{d} - \frac{d}{2a_e} \quad \text{rad} \quad (69b)$$

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:

$$\varepsilon_{pt} = \frac{\theta_t}{1000} \quad \text{rad} \quad (70a)$$

et

$$\varepsilon_{pr} = \frac{\theta_r}{1000} \quad \text{rad} \quad (70b)$$

À noter que les angles par rapport à l'horizon radioélectrique, θ_t et θ_r (mrad), apparaissent pour la première fois dans le Tableau 4 et sont définis respectivement aux § 5.1.1 et § 5.1.3 de la Pièce jointe 2 à l'Annexe 1.

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

$$\chi_t = \arccos(\cos(\varepsilon_t) \cos(\varepsilon_{pt}) \cos(\alpha_{tr} - \alpha_t) + \sin(\varepsilon_t) \sin(\varepsilon_{pt})) \quad (71a)$$

et

$$\chi_r = \arccos(\cos(\varepsilon_r) \cos(\varepsilon_{pr}) \cos(\alpha_{rt} - \alpha_r) + \sin(\varepsilon_r) \sin(\varepsilon_{pr})) \quad (71b)$$

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:

$$L = L_b(p) - G_t - G_r \quad \text{dB} \quad (72)$$

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

Aux fréquences supérieures à 5 GHz environ, où les dimensions des hydrométéores sont comparables ou supérieures aux longueurs d'onde, les brouillages dus à la diffusion par les hydrométéores peuvent avoir des interactions significatives. Contrairement aux méthodes 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 et 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 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. 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

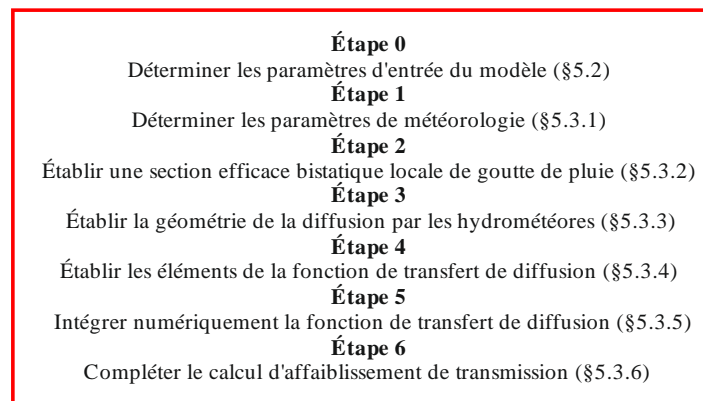
étant choisis arbitrairement. Cette méthode est donc tout indiquée pour toute une série de scénarios et de services, notamment pour déterminer le brouillage dû à la diffusion par la pluie entre deux stations de Terre, entre une station de Terre et une station terrienne et entre deux stations terriennes exploitées dans des bandes de fréquences attribuées dans les deux sens de transmission. La méthode est fondée sur une formule mathématique décrivant l'affaiblissement de transmission entre deux stations dû à la diffusion par les hydrométéores. La formule de l'affaiblissement de transmission ne tient compte que de la diffusion unique de gouttes de pluie. La diffusion multiple n'est pas prise en compte en raison des valeurs d'affaiblissement plus élevées attribuées à la fois aux gaz atmosphériques et aux précipitations. En outre, la diffusion par les hydrométéores peut être ignorée dans les cas suivants:

- aucune précipitation entre deux stations;
- fréquences au-dessous de 5 GHz;
- les largeurs de bande des deux stations ne se chevauchent pas, car il est peu probable que ce mécanisme cause des brouillages dans les canaux adjacents;
- les faisceaux principaux des antennes de station sont parallèles entre eux (78);
- l'angle de divergence hors axe d'une station (79) est supérieur à son ouverture de faisceau.

La méthode exposée ci-après permet de calculer l'affaiblissement dû à la diffusion par les hydrométéores pour un seul cas de couplage faisceau principal-faisceau principal. Toutefois, elle peut être adaptée pour calculer l'affaiblissement dû à la diffusion par les hydrométéores due soit au couplage faisceau principal-lobe latéral, soit au couplage lobe latéral-faisceau principal. Pour ce faire, on peut remplacer les caractéristiques du faisceau principal de l'antenne de station requise par les caractéristiques du lobe latéral. Dans ce cas, tous les paramètres du lobe latéral remplacent les paramètres correspondants du faisceau principal remplacé. Par exemple, en remplaçant un faisceau principal par un lobe latéral, l'angle de diffusion (78) et les angles de divergence (79) sont mesurés par rapport à l'axe de visée du lobe latéral utilisé.

FIGURE 3

Organigramme de l'algorithme de diffusion par les hydrométéores



P.0452-0 3

5.1 Principe théorique de l'affaiblissement de transmission dû à la diffusion par les hydrométéores

L'affaiblissement de transmission, (dB), dû à la diffusion par les hydrométéores entre deux stations, à savoir la Station 1 avec la polarisation q ($q = v, h$) et la Station 2 avec la polarisation p ($p = v, h$), compte tenu de la formule relative au radar bistatique, est exprimé comme suit:

$$L_{pq} = 73,4399 + 20 \log_{10} f - 10 \log_{10} C_{pq} \quad \text{dB} \quad (73)$$

où:

f : fréquence (GHz)

C_{pq} : fonction de transfert de diffusion, y compris l'intégration volumique sur la cellule de pluie ($\text{m}^{-1}\text{km}^{-1}$)

$$C_{pq} = \iiint \frac{G_1 G_2 \sigma_{pq}}{r_{A1}^2 r_{A2}^2} \exp(-c[\mathcal{K}_{atm} + \mathcal{K}_{rain}]) \zeta(h) dV \quad (74)$$

NOTE – Une expression numérique de cette intégrale est donnée dans la suite de la présente Annexe sous la forme des équations (132) et (133).

$G_{1,2}$: gains linéaires, respectivement de la Station 1 et de la Station 2

$r_{A1,2}$: distances (km), entre l'élément d'intégration dV et la Station 1 et la Station 2

σ_{pq} : section efficace bistatique de goutte de pluie par unité de volume (m^2m^{-3}); § 5.3.4.4

c : constante pour convertir l'affaiblissement (dB) en népers ($c = 0,23026$)

\mathcal{K}_{atm} : affaiblissement dû aux gaz atmosphériques le long du trajet entre l'émetteur et le récepteur (dB) traversant l'élément d'intégration; § 5.3.4.2

\mathcal{K}_{rain} : affaiblissement dû à la pluie le long du trajet entre l'émetteur et le récepteur (dB) traversant l'élément d'intégration; § 5.3.4.3

$\zeta(h)$: corrélation entre la hauteur et la réflectivité du radar:

$$\zeta(h) = \begin{cases} 1 & \text{pour } h \leq h_R \\ 10^{-0,65(h-h_R)} & \text{pour } h > h_R \end{cases} \quad (75)$$

h_R : hauteur de pluie (km);

dV : volume de l'élément d'intégration différentiel (km^3).

5.2 Paramètres d'entrée du modèle

TABEAU 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 du trajet de grand cercle
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_1, G_2	dB	Gain pour chaque antenne en fonction à la fois de l'angle de l'axe de visée et de la polarisation de l'antenne
BW_1, BW_2	rad	Ouvertures de faisceau d'antenne. Les ouvertures de faisceau peuvent concerner soit les faisceaux principaux soit les lobes latéraux, selon le couplage requis.
$p_R(R)$		Distribution de probabilité du taux de précipitation
M	dB	Désadaptation de polarisation entre les systèmes
P	hPa	Pression à la surface (valeur par défaut 1 013,25 hPa)
$p_h(h)$		Distribution de probabilité de la hauteur de pluie

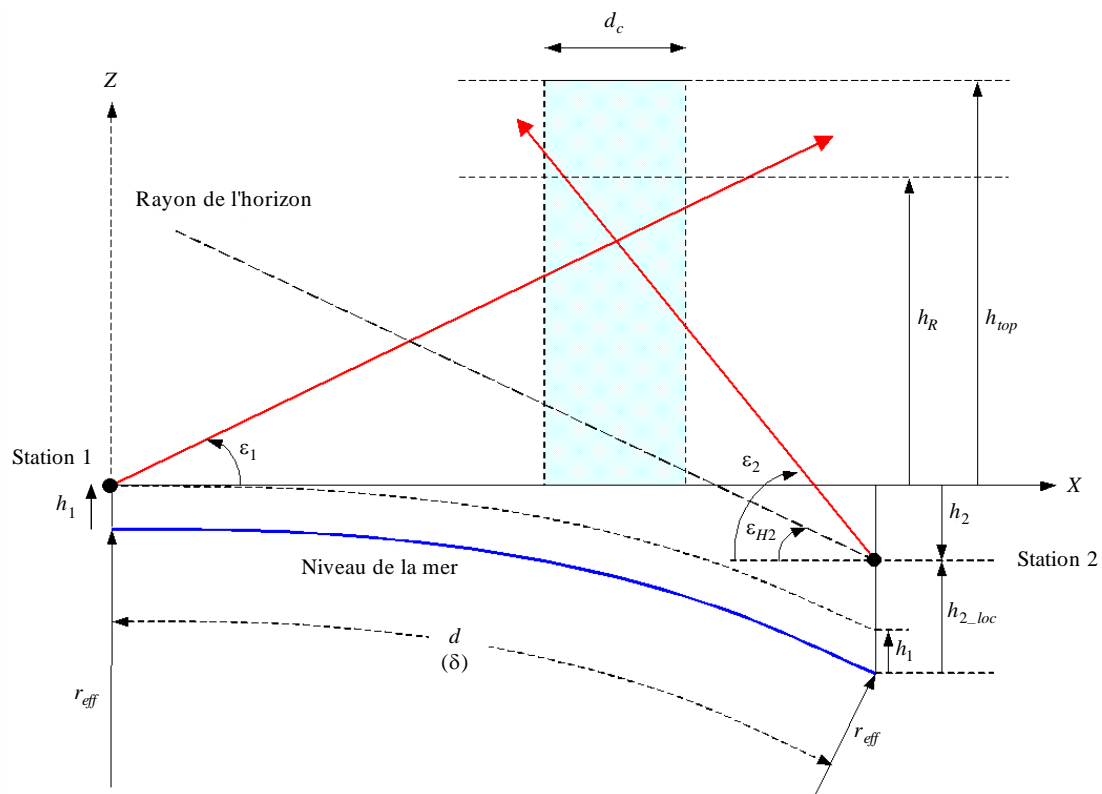
TABLEAU 5 (fin)

Paramètre	Unité	Description
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 azimut géographique de la Station 2 vers la Station 1, dans le sens des aiguilles d'une montre
$\varepsilon_{H1_loc}, \varepsilon_{H2_loc}$	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)
Lat_1,2 Lon_1,2	degrés	Latitude et longitude de la Station 1 et de la Station 2
R_p		Le pourcentage soumis à la quantité ne sera pas dépassé

5.2.1 Paramètres géométriques de liaison

Outre les paramètres d'entrée ci-dessus, les paramètres géométriques de liaison peuvent être considérés comme des paramètres d'entrée. S'ils ne sont pas fournis, ces paramètres sont calculés et sauvegardés pour une utilisation ultérieure.

FIGURE 4
Géométrie des stations pour une Terre courbe



P.0452-04

5.2.1.1 Axes de visée de l'antenne de la station (faisceaux principaux)

La Figure 5 illustre la configuration géométrique de la liaison de diffusion par les hydrométéores en utilisant la coordonnée cartésienne de la Station 1 comme coordonnée commune. Dans cette coordonnée, la Station 1 est située à l'origine (0, 0, 0), le plan x-y est le plan horizontal, l'axe des x

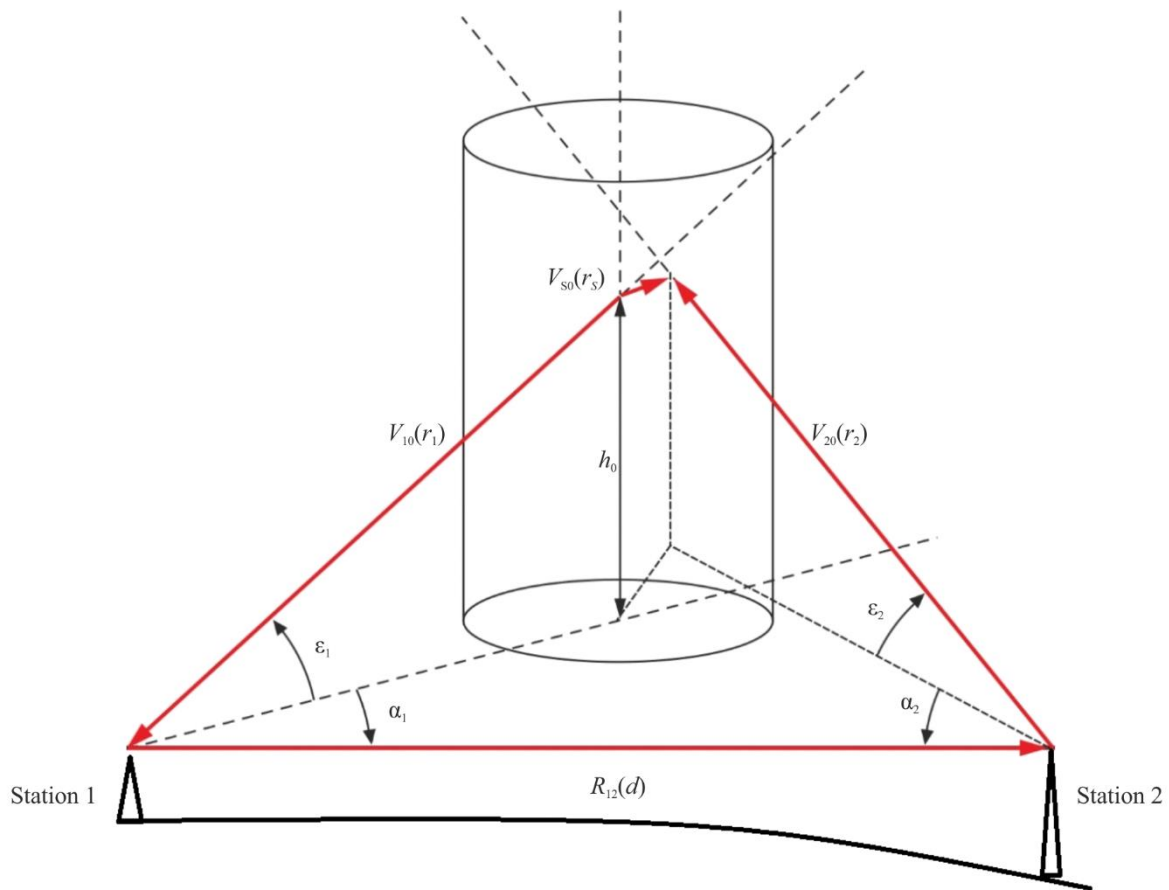
pointe en direction de la Station 2 et l'axe des z pointe verticalement vers le haut. L'axe de visée de l'antenne de la Station 1 est donné par le vecteur unitaire V_{10} :

$$V_{10} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_1 \cos \alpha_1 \\ \cos \varepsilon_1 \sin \alpha_1 \\ \sin \varepsilon_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{10} \\ y_{10} \\ z_{10} \end{bmatrix} \quad (76)$$

Dans l'équation (76), $\varepsilon_1 = \varepsilon_{1_loc}$, et $\alpha_1 = \alpha_{1_loc}$, et ε_{1_loc} et α_{1_loc} sont les angles d'élévation et d'azimut locaux de l'axe de visée de l'antenne de la Station 1.

FIGURE 5

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



P.0452-05

L'axe de visée de l'antenne de la Station 2 est représenté par le vecteur unitaire de longueur V_{20} :

$$V_{20} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_2 \cos \alpha_2 \\ \cos \varepsilon_2 \sin \alpha_2 \\ \sin \varepsilon_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin \varepsilon_{2_loc} \sin \delta - \cos \varepsilon_{2_loc} \cos \alpha_{2_loc} \cos \delta \\ - \cos \varepsilon_{2_loc} \sin \alpha_{2_loc} \\ \sin \varepsilon_{2_loc} \cos \delta + \cos \varepsilon_{2_loc} \cos \alpha_{2_loc} \sin \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{20} \\ y_{20} \\ z_{20} \end{bmatrix} \quad (77a)$$

Les angles ε_2 et α_2 sont les angles d'élévation et d'azimut de la Station 2 depuis la Station 1 dans la trame commune; et ε_{2_loc} , et α_{2_loc} sont les angles correspondants dans la trame locale de l'antenne de la Station 2. De plus, δ est l'angle sous-tendu par les deux stations au centre de la Terre ($\delta = d/r_{eff}$, $r_{eff} = a_e = k_{50}a$ est la valeur (médiane) du rayon terrestre équivalent, a est le rayon moyen de la Terre, a (étant déterminé dans l'équation (6a)), et k_{50} (étant déterminé dans

l'équation (5)) est le facteur multiplicatif du rayon médian). Pour de faibles valeurs de δ , la courbure de la Terre pourrait être ignorée; et ε_2 et α_2 sont égaux à ε_{2_loc} et $\alpha_{2_loc} + \pi$ respectivement.

Le vecteur de la Station 1 à la Station 2 est comme suit:

$$\mathbf{V}_{12} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad \mathbf{R}_{12} = \mathbf{V}_{12} \quad (77b)$$

5.2.1.2 Angle de diffusion du faisceau principal

L'angle de diffusion du faisceau principal, φ_{ms} , est l'angle entre les deux faisceaux principaux de l'antenne (axes de visée de l'antenne) et il est déterminé à partir du produit scalaire des deux vecteurs unitaires \mathbf{V}_{10} and \mathbf{V}_{20} :

$$\varphi_{ms} = \cos^{-1}(-\mathbf{V}_{20} \cdot \mathbf{V}_{10}) = \cos^{-1}(-\{\cos \varepsilon_1 \cos \varepsilon_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2) + \sin \varepsilon_1 \sin \varepsilon_2\}) \quad (78)$$

Si $\varphi_{ms} < 0,001$ rad, les deux faisceaux d'antenne sont approximativement parallèles ou colinéaires. Si les faisceaux d'antenne sont à peu près parallèles les uns aux autres, le couplage par diffusion par la pluie est négligeable et il n'est pas nécessaire de calculer la diffusion par les hydrométéores.

5.2.1.3 Angles de divergence hors axe

Les angles de divergence hors axe $\psi_{1,2}$ au niveau de la Station 1 ou 2 du point de rapprochement maximal sur l'axe du faisceau principal de l'autre station sont donnés par la formule suivante:

$$\Psi_{1,2} = \tan^{-1}\left(\frac{r_s}{r_{1,2}}\right) \quad (79)$$

Les distances r_1 , r_2 et r_s peuvent être calculées à partir de l'équation (80), où (x_{10}, y_{10}, z_{10}) et (x_{20}, y_{20}, z_{20}) sont les composantes des vecteurs unitaires \mathbf{V}_{10} et \mathbf{V}_{20} respectivement.

$$\begin{bmatrix} r_s \\ r_1 \\ r_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{s0} & x_{10} & -x_{20} \\ y_{s0} & y_{10} & -y_{20} \\ z_{s0} & z_{10} & -z_{20} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} d \\ 0 \\ h_2 \end{bmatrix}, \quad h_2 = h_{2_loc} - h_{1_loc} - d \frac{\delta}{2} \quad \text{km} \quad (80)$$

Dans l'équation (80), h_2 correspond à la hauteur de la Station 2 au-dessus du plan de référence.

L'opérateur $[\]^{-1}$ est l'opérateur de matrice inverse. Les valeurs x_{s0} , y_{s0} , et z_{s0} sont des composantes du vecteur unitaire \mathbf{V}_{s0} dérivées du produit vectoriel des vecteurs unitaires \mathbf{V}_{10} et \mathbf{V}_{20} .

$$\mathbf{V}_{s0} = \frac{\mathbf{V}_{20} \times \mathbf{V}_{10}}{\sin \varphi_{ms}} = \frac{1}{\sin \varphi_{ms}} \begin{bmatrix} y_{20}z_{10} - z_{20}y_{10} \\ z_{20}x_{10} - x_{20}z_{10} \\ x_{20}y_{10} - y_{20}x_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{s0} \\ y_{s0} \\ z_{s0} \end{bmatrix} \quad (81)$$

Si un angle de divergence est inférieur à l'ouverture de faisceau à 3 dB de l'antenne considérée, un couplage faisceau principal-faisceau principal est possible et il est nécessaire de calculer la diffusion par les hydrométéores.

5.3 Étapes de l'application de l'algorithme de diffusion par les hydrométéores

S'il est déterminé qu'il est nécessaire de calculer l'affaiblissement de transmission dû à la diffusion par les hydrométéores, les étapes de l'algorithme ci-après peuvent être appliquées pour obtenir l'affaiblissement de transmission.

5.3.1 Étape 1: Déterminer les paramètres de météorologie

Les paramètres de météorologie requis par l'algorithme sont les suivants:

- affaiblissement linéique dans l'atmosphère;

- affaiblissement linéique dû à la pluie;
- structure de cellule de pluie;
- hauteur de pluie.

Les prescriptions suivantes sont définies pour chaque paramètre.

5.3.1.1 Affaiblissement linéique dans l'atmosphère γ_{atm}

L'affaiblissement linéique dans l'atmosphère γ_{atm} est nécessaire pour obtenir l'affaiblissement dû aux gaz atmosphériques \mathcal{K}_{atm} le long du trajet de propagation entre l'émetteur et le récepteur en passant par le volume de diffusion (voir le § 5.3.3). L'affaiblissement linéique dans l'atmosphère peut être obtenu à partir de l'Annexe 1 de la Recommandation UIT-R P.676 en termes de profil de température atmosphérique, de pression et de densité de vapeur d'eau.

5.3.1.2 Affaiblissement linéique dû à la pluie γ_R

Le modèle de prévision de l'affaiblissement linéique dû à la pluie de la présente Recommandation diffère de celui de la Recommandation UIT-R P.838 et ne devrait être utilisé qu'aux fins de prévision du brouillage dû à la diffusion par les hydrométéores, tel que requis au § 5. La raison de cette mise en garde est que le modèle de prévision de l'affaiblissement linéique dû à la pluie figurant dans la Recommandation UIT-R P.838 est élaboré pour les gouttes de pluie sphéroïdales aplaties, tandis que le modèle de diffusion par les hydrométéores est élaboré pour les gouttes de pluie sphériques. Cette différence a une incidence sur les formules qui incluent les formules de l'affaiblissement linéique dû à la pluie des équations (82) à (87) et les formules de section efficace bistatique des gouttes de pluie des équations (123a) à (123d). En outre, le modèle d'affaiblissement linéique dû à la pluie de la Recommandation UIT-R P.838 ne dépend pas de la température, alors que l'affaiblissement linéique dû à la pluie et la section efficace bistatique du présent paragraphe ont une dépendance à la température.

L'affaiblissement linéique dû à la pluie γ_R est nécessaire pour calculer l'affaiblissement dû à la pluie \mathcal{K}_{rain} le long du trajet de propagation de l'émetteur au récepteur en passant par le volume de diffusion; il est exprimé en termes d'intensité de pluie R , par la formule suivante:

$$\gamma_{R1,2} = \kappa_{1,2} R^{\alpha_{1,2}} \quad (\text{dB/km}) \quad (82)$$

Les coefficients $\kappa_{1,2}$ et $\alpha_{1,2}$ sont fonction de la fréquence f (GHz), et de la température des gouttes d'eau comme indiqué dans les équations (83) à (85).

$$\alpha_{1,2} = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4 + a_5 x^5 + a_6 x^6 \quad (83)$$

$$\kappa_{1,2} = \exp(b_0 + b_1 x + b_2 x^2 + b_3 x^3 + b_4 x^4 + b_5 x^5) \quad (84)$$

$$x = \ln(f) \quad (85)$$

Les coefficients a_m de l'équation (83) et les coefficients b_n de l'équation (84) dépendent de la température T (°C).

La dépendance à la température de chacun des coefficients a_n et b_n peut être exprimée comme suit:

$$a_m = c_0^m + c_1^m T + c_2^m T^2, \quad m = 0,1,2,3,4,5,6 \quad (86)$$

$$b_m = d_0^m + d_1^m T + d_2^m T^2, \quad m = 0,1,2,3,4,5 \quad (87)$$

Les Tableaux 6 et 7 donnent les valeurs c_i^m et d_i^m ($i = 0,1,2$).

5.3.1.3 Structure de la cellule de pluie

La cellule de pluie a une symétrie cylindrique à l'intérieur de la section transversale horizontale, où le taux de précipitation est supposé décroître exponentiellement à mesure que l'on s'éloigne du centre de la cellule de pluie, et peut s'exprimer comme suit:

$$R(\rho) = R_m \exp(-\rho/\rho_0) \quad \text{mm/hr} \quad (88)$$

où ρ est la distance radiale à partir du centre de la cellule de pluie, R_m est la valeur crête du taux de précipitation, et ρ_0 est une «distance caractéristique» à partir du centre de la cellule, avec:

$$\rho_0 = \frac{10^{-1,5} \log_{10} R_m}{\ln\left(\frac{R_m}{0,4}\right)} \quad \text{km}, \quad R_m > 0,4 \text{ mm/hr} \quad (89)$$

5.3.1.4 Hauteur de pluie

La hauteur de pluie moyenne au-dessus du niveau moyen de la mer, h_R , qui est comprise entre 4 et 5 km, peut être obtenue à partir de la hauteur de l'isotherme 0 °C, h_{iso} .

$$h_R = h_{iso} + 0,36 \quad \text{km} \quad (90)$$

La hauteur moyenne de l'isotherme 0 °C au-dessus du niveau moyen de la mer, h_{iso} , peut être calculée au moyen de la Recommandation UIT-R P.839-4.

5.3.2 Étape 2: Établir une section efficace bistatique locale de goutte de pluie

La section efficace bistatique locale de goutte de pluie η_1 dans la trame locale de la goutte de pluie symétrique peut être exprimée en termes d'angle de diffusion φ_s comme suit:

$$\eta_1(\varphi) = \exp\{u_0 + u_1(\sin 0,5\varphi_s)^2 + u_2(\sin 0,5\varphi_s)^4 + u_3(\sin 0,5\varphi_s)^6\} \quad (91)$$

Les coefficients u_i 's ($i = 0,1,2,3$) dans l'équation (91) sont liés au taux de précipitation comme indiqué dans l'équation (92)

$$\begin{aligned} u_i &= a_0^i + a_1^i \ln(R) + a_2^i \{\ln(R)\}^2, & i = 0, 1 \\ u_i &= a_0^i + a_1^i \ln(R) + a_2^i \{\ln(R)\}^2 + a_3^i \{\ln(R)\}^3, & i = 2, 3 \end{aligned} \quad (92)$$

En outre, la dépendance de chacun des coefficients a_n^i 's de l'équation (92) à la fréquence f peut être représentée par un polynôme algébrique du sixième ordre.

$$a_n^i = \sum_{m=0}^7 b_{n,m}^i f^m, \quad i = 0,1,2,3 \text{ et } n = 0,1,2,3 \quad (93)$$

De plus, chacun des coefficients $b_{n,m}^i$'s de l'équation (93) est lié à la température T comme indiqué dans l'équation (94).

$$b_{n,m}^i = c_0 + c_1 T + c_2 T^2 \quad (94)$$

Les valeurs des coefficients c_0 's, c_1 's et c_2 's sont données dans les Tableaux 8 à 21.

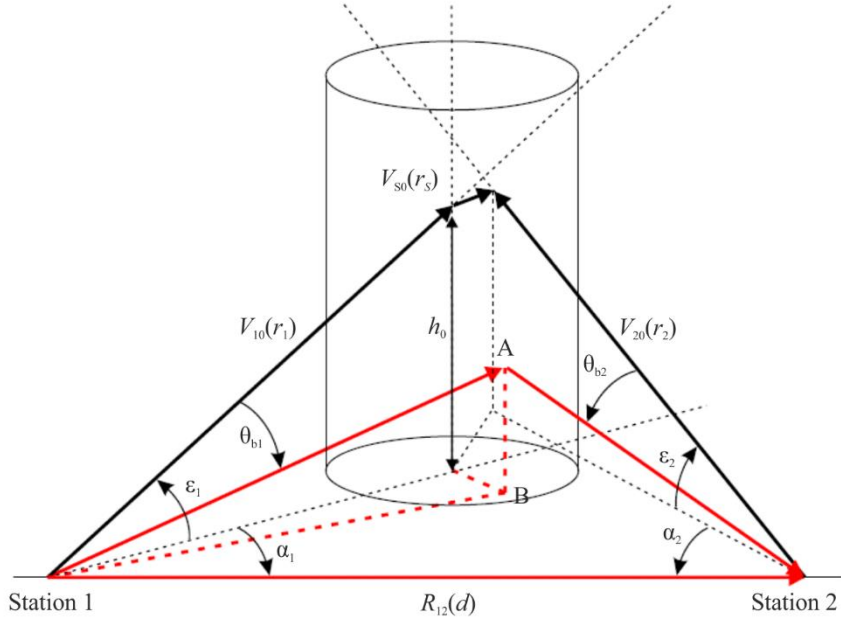
5.3.3 Étape 3: Établir la géométrie de la diffusion par les hydrométéores

La géométrie de la diffusion par les hydrométéores est établie (par approximation de la Terre plate) en établissant une cellule de pluie dont l'axe vertical coupe l'axe du faisceau principal de la Station 1 au point 0 (x_0, y_0, h_0), comme illustré dans la Fig. 6.

$$\begin{aligned} x_0 &= r_1 \cos \varepsilon_1 \cos \alpha_1 \\ y_0 &= r_1 \cos \varepsilon_1 \sin \alpha_1 \\ h_0 &= r_1 \sin \varepsilon_1 \end{aligned} \quad (95)$$

La distance r_1 dans l'équation (95) peut être obtenue à partir de l'équation (80). Lors de l'établissement de la géométrie de la diffusion par les hydrométéores, le centre de la cellule de pluie peut être modifié en fonction des scénarios qui minimisent les valeurs des affaiblissements de transmission et, par conséquent, maximisent la puissance du signal brouilleur diffusé. Un point A (x, y, h) à l'intérieur de la cellule représente un élément d'intégration arbitraire et un point B est la projection du point A sur le plan au sol (voir la Fig. 6).

FIGURE 6
Géométrie de la diffusion par les hydrométéores



P.0452-06

Pour faciliter l'intégration de la fonction de transfert de diffusion de l'équation (74), les coordonnées cartésiennes de l'élément d'intégration A (x, y, h) sont converties en coordonnées cylindriques (ρ, φ, z).

$$x = x_0 + \rho \cos \varphi$$

$$y = y_0 + \rho \sin \varphi$$

$$h = h_0 + z$$

$$dV = \rho \, d\rho \, d\varphi \, dz \tag{96}$$

Le centre du système de coordonnées est le point 0 (x_0, y_0, h_0) où il y a intersection entre l'axe vertical de la cellule de pluie et l'axe de visée de la Station 1. Avec un système de coordonnées cylindriques, les distances $r_{A1,2}$ qui séparent la Station 1 et la Station 2 de l'élément d'intégration au point A (ρ, φ, z) peuvent être exprimées comme suit:

$$r_{A1} = r'_1 D_{A1}, \quad D_{A1} = \sqrt{1 + \{\rho^2 + z^2 + 2\rho d'_1 \cos(\alpha_1 - \varphi) + 2h_0 z\}/(r'_1)^2}$$

$$r'_1 = \sqrt{(d'_1)^2 + h_0^2}, \quad d'_1 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}$$

$$\alpha_1 = \tan^{-1} \left(\frac{y_0}{x_0} \right)$$

$$r_{A2} = r'_2 D_{A2}$$

$$D_{A2} = \sqrt{1 + \{\rho^2 + z^2 + 2\rho d'_2 \cos(\alpha_2 - \varphi) + 2(h_0 - h_2)z\}/(r'_2)^2} \quad (97)$$

$$r'_2 = \sqrt{(d'_2)^2 + (h_0 - h_2)^2}, \quad d'_2 = \sqrt{(x_0 - d)^2 + y_0^2}$$

$$\alpha_2 = \tan^{-1}\left(\frac{y_0}{x_0 - d}\right)$$

Les vecteurs position $\mathbf{R}_{A1,2}(\rho, \varphi, z)$ sont donnés par:

$$\mathbf{R}_{A1}(\rho, \varphi, z) = \begin{bmatrix} x \\ y \\ h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 + \rho \cos \varphi \\ y_0 + \rho \sin \varphi \\ h_0 + z \end{bmatrix} = r_{A1} \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_{A1} \cos \alpha_{A1} \\ \cos \varepsilon_{A1} \sin \alpha_{A1} \\ \sin \varepsilon_{A1} \end{bmatrix} \quad (98a)$$

$$\mathbf{R}_{A2}(\rho, \varphi, z) = \begin{bmatrix} x - d \\ y \\ h - h_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 + \rho \cos \varphi - d \\ y_0 + \rho \sin \varphi \\ h_0 + z - h_2 \end{bmatrix} = r_{A2} \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_{A2} \cos \alpha_{A2} \\ \cos \varepsilon_{A2} \sin \alpha_{A2} \\ \sin \varepsilon_{A2} \end{bmatrix} \quad (98b)$$

avec

$$|\mathbf{R}_{A1}| = \sqrt{(x_0 + \rho \cos \varphi)^2 + (y_0 + \rho \sin \varphi)^2 + (h_0 + z)^2} = r_{A1} \quad (99a)$$

et

$$|\mathbf{R}_{A2}| = \sqrt{(x_0 + \rho \cos \varphi - d)^2 + (y_0 + \rho \sin \varphi)^2 + (h_0 + z - h_2)^2} = r_{A2} \quad (99b)$$

De plus, les angles d'élévation $\varepsilon_{A1,2}$ des vecteurs position $\mathbf{R}_{A1,2}(\rho, \varphi, z)$ sont donnés par:

$$\varepsilon_{A1} = \tan^{-1}\left(\frac{h_0 + z}{d_{B1}}\right) \quad (100a)$$

$$\varepsilon_{A2} = \tan^{-1}\left(\frac{(h_0 - h_2) + z}{d_{B2}}\right) \quad (100b)$$

où:

$$d_{B1} = \sqrt{x^2 + y^2} = \sqrt{d'^2_1 + \rho^2 + 2\rho d'_1 \cos(\alpha_1 - \varphi)}$$

et

$$d_{B2} = \sqrt{(x - d)^2 + y^2} = \sqrt{(d'_2)^2 + \rho^2 + 2\rho d'_2 \cos(\alpha_2 - \varphi)} \quad (101)$$

On notera que $r_{A1} = \sqrt{(d_{B1})^2 + (h_0 + z)^2}$, et $r_{A2} = \sqrt{(d_{B2})^2 + (h_0 - h_2 + z)^2}$. De plus, pour obtenir (100a) et (100b), on utilise le membre droit des équations (98a) et (98b) respectivement, ainsi que l'équation (101).

Les angles d'azimut $\alpha_{A1,2}$ des vecteurs position $\mathbf{R}_{A1,2}(\rho, \varphi, z)$ sont donnés par:

$$\alpha_{A1} = \tan^{-1}\left(\frac{y_0 + \rho \sin \varphi}{x_0 + \rho \cos \varphi}\right)$$

$$\alpha_{A2} = \tan^{-1}\left(\frac{y_0 + \rho \sin \varphi}{x_0 - d + \rho \cos \varphi}\right) \quad (102)$$

Sur la base de l'équation (96), l'intégrale de la fonction de transfert de diffusion de l'équation (74) peut être réduite à:

$$C_{pq} = \int_{z_{min}}^{z_{max}} \int_0^{2\pi} \int_0^{\rho_{max}} \mathcal{F}(\rho, \varphi, z) \rho d\rho d\varphi dz \quad (103)$$

$$\mathcal{F}(\rho, \varphi, z) = \frac{G_1(\theta_{A1})G_2(\theta_{A2})\sigma_{pq}\exp(-c\mathcal{K}(A))\zeta(h)}{r_{A1}^2 r_{A2}^2} \quad (104)$$

$\mathcal{K}(A)$ est l'atténuation de la Station 1 à la Station 2 passant par le point A avec:

$$\mathcal{K}(A) = \mathcal{K}_{atm}(A) + \mathcal{K}_{rain}(A) \quad (105)$$

Dans l'équation (105), $\mathcal{K}_{atm}(A)$ et $\mathcal{K}_{rain}(A)$ correspondent à l'atténuation entre la Station 1 et la Station 2 en passant par le point A , due aux gaz atmosphériques et à la pluie, respectivement.

Pour les limites d'intégration de l'équation (103), les hauteurs minimale et maximale, z_{min} et z_{max} , dépendent des largeurs de faisceau de la Station 1 et de la Station 2.

$$z_{1max} = \sqrt{x_0^2 + y_0^2} \tan(\epsilon_1 + 0,5BW_1) - h_0 \quad (106)$$

$$z_{1min} = \sqrt{x_0^2 + y_0^2} \tan(\epsilon_1 - 0,5BW_1) - h_0 \quad (107)$$

$$z_{2max} = \sqrt{(x_0 - d)^2 + y_0^2} \tan(\epsilon_2 + 0,5BW_2) - h_0 \quad (108)$$

$$z_{2min} = \sqrt{(x_0 - d)^2 + y_0^2} \tan(\epsilon_2 - 0,5BW_2) - h_0 \quad (109)$$

$$z_{max} = \min\{\max(z_{1max}, z_{2max}), h_R\} \quad (110)$$

$$z_{min} = \min(z_{1min}, z_{2min}) \quad (111)$$

BW_1 et BW_2 sont les largeurs de faisceau de la Station 1 et de la Station 2, respectivement, exprimées en radians. ρ_{max} , qui détermine la limite d'intégration sur $d\rho$, est donné par l'équation (112).

$$\rho_{max} = \frac{1}{2}\{\rho_1 + \rho_2\} \quad \text{km} \quad (112)$$

$$\rho_1 = x_0 - \frac{d}{1 + \tan(\epsilon_1 + 0,5BW_1) \cot(\epsilon_2 - 0,5BW_2)} \quad \text{km} \quad (113)$$

$$\rho_2 = (d - x_0) - \frac{d}{1 + \tan(\epsilon_2 + 0,5BW_2) \cot(\epsilon_1 - 0,5BW_1)} \quad \text{km} \quad (114)$$

Les intensités en champ proche des antennes dépendent de détails propres au matériel, et il est possible que l'on n'ait pas accès à ces informations pour l'analyse des brouillages. Il est utile de prendre comme hypothèse que le champ sera environ du même ordre de grandeur que celui présent au début de la région du champ lointain. Des mesures réelles d'intensités en champ proche montrent que cette hypothèse se vérifie.

L'angle de diffusion φ_s entre la Station 1 et le point d'intégration A est donné par:

$$\varphi_s = \cos^{-1} \left(-\frac{r_{A1}}{r_{A2}} + \frac{d(x_0 + \rho \cos \varphi) + h_2(h_0 + z)}{r_{A1}r_{A2}} \right) \quad (115)$$

5.3.4 Étape 4: Établissement des éléments de la fonction de transfert de diffusion

5.3.4.1 Gains d'antenne

Les gains d'antenne G_1 et G_2 au niveau de l'élément d'intégration $A(\rho, \varphi, z)$ peuvent être obtenus en introduisant les valeurs des angles de visée hors axe $\theta_{A1,2}$ dans le diagramme de gain correspondant qui figure dans les paramètres d'entrée du Tableau 6. L'angle de visée hors axe θ_{A1} est l'angle entre le vecteur unitaire V_{A1} allant de la Station 1 à l'élément d'intégration, et la direction du faisceau principal de la Station 1. Cet angle est donné par:

$$\theta_{A1} = \cos^{-1}\{\cos \epsilon_1 \cos \epsilon_{A1} \cos(\alpha_1 - \alpha_{A1}) + \sin \epsilon_1 \sin \epsilon_{A1}\} \quad (116)$$

L'angle de visée hors axe θ_{A2} est l'angle entre le vecteur unitaire V_{A2} allant de la Station 2 à l'élément d'intégration, et le faisceau principal de la Station 2. Cet angle est donné par:

$$\theta_{A2} = \cos^{-1}\{\cos \epsilon_2 \cos \epsilon_{A2} \cos(\alpha_2 - \alpha_{A2}) + \sin \epsilon_2 \sin \epsilon_{A2}\} \quad (117)$$

5.3.4.2 Affaiblissement atmosphérique

L'affaiblissement \mathcal{K}_{atm} dû à l'absorption par les gaz atmosphériques sur les trajets de propagation allant jusqu'à l'élément d'intégration situé au point $A(\rho, \varphi, z)$ peut être calculé à partir de l'affaiblissement linéique dans l'atmosphère γ_{atm} donné au § 5.3.1.1.

En divisant les distances de propagation $r_{A1,2}$ par $N_{1,2}$ intervalles de longueur $\Delta h_{t1,2}/\sin \epsilon_{A1,2}$, on obtient les additions suivantes, et les intervalles sont donnés au § 5.3.4.3.

$$\mathcal{K}_{atm} = \sum_{t1=1}^{N_1} \frac{\gamma_{atm}(t1)\Delta h_{t1}}{\sin \epsilon_{A1}} + \sum_{t2=1}^{N_2} \frac{\gamma_{atm}(t2)\Delta h_{t2}}{\sin \epsilon_{A2}} \approx \sum_{t1=1}^{N_1} \frac{\gamma_{atm}(t1)r_{A1}}{N_1} + \sum_{t2=1}^{N_2} \frac{\gamma_{atm}(t2)r_{A2}}{N_2} \quad (118)$$

5.3.4.3 Affaiblissement dû à la pluie

Comme pour l'affaiblissement dû aux gaz atmosphériques, l'affaiblissement \mathcal{K}_{rain} sur les trajets de propagation allant jusqu'à l'élément d'intégration situé au point $A(\rho, \varphi, z)$ peut être calculé à partir de l'affaiblissement linéique dû à la pluie $\gamma_{R1,2}$ donné au § 5.3.1.2.

En divisant les distances de propagation $r_{A1,2}$ par $N_{1,2}$ intervalles de longueur $\Delta h_{t1,2}/\sin \epsilon_{A1,2}$, on obtient les additions suivantes.

$$\mathcal{K}_{rain} = \sum_{t1=1}^{N_1} \frac{\gamma_{R1}(t1)\Delta h_{t1}}{\sin \epsilon_{A1}} + \sum_{t2=1}^{N_2} \frac{\gamma_{R2}(t2)\Delta h_{t2}}{\sin \epsilon_{A2}} \quad (119)$$

Tout d'abord, on paramètre le trajet de propagation avec le paramètre t à l'intervalle (0,1) depuis le point (0,0,0) jusqu'au point d'intégration A, comme suit:

$$s(t) = \mathbf{R}_{A1}t + (0,0,0) = \begin{bmatrix} x_0 + \rho \cos \varphi \\ y_0 + \rho \sin \varphi \\ h_0 + z \end{bmatrix} t \quad (120)$$

$$|\mathbf{R}_{A1}| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = \sqrt{(x_0 + \rho \cos \varphi)^2 + (y_0 + \rho \sin \varphi)^2 + (h_0 + z)^2} \quad (121)$$

Ainsi, pour les points d'intégration N_1 , le facteur est le suivant: $\frac{\Delta h_{t1}}{\sin \epsilon_{A1}} = \frac{r_{A1}}{N_1}$

Ensuite, on paramètre le trajet de propagation avec le paramètre t à l'intervalle (0,1) depuis le point $(d, d \sin \alpha_1, h_{2_loc})$ jusqu'au point d'intégration A, comme suit:

$$s(t) = \mathbf{R}_{A2}t + \begin{bmatrix} d \\ d \sin \alpha_1 \\ h_{2_loc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 + \rho \cos \varphi - d \\ y_0 + \rho \sin \varphi + d \sin \alpha_1 \\ h_0 + z - h_2 \end{bmatrix} t + \begin{bmatrix} d \\ d \sin \alpha_1 \\ h_2 \end{bmatrix} \quad (122)$$

Ainsi, pour les points d'intégration N_2 , le facteur est le suivant: $\frac{\Delta h_{t2}}{\sin \epsilon_{A1}} = \frac{r_{A2}}{N_2}$.

5.3.4.4 Section efficace bistatique dans la trame commune

Au niveau de l'élément d'intégration $A(\rho, \varphi, z)$, les sections efficaces bistatiques locales de gouttes de pluie η_1 de l'équation (91) peuvent être utilisées pour formuler les sections efficaces bistatiques dans la trame commune σ_{pq} 's.

$$\sigma_{vv} = \eta_1 \{ \cos \varphi_s \cos \alpha_{vs} \cos \alpha_{vi} + \sin \alpha_{vs} \sin \alpha_{vi} \}^2 \quad (123a)$$

$$\sigma_{vh} = \eta_1 \{ \cos \varphi_s \cos \alpha_{vs} \sin \alpha_{vi} - \sin \alpha_{vs} \cos \alpha_{vi} \}^2 \quad (123b)$$

$$\sigma_{hv} = \eta_1 \{ \cos \varphi_s \sin \alpha_{vs} \cos \alpha_{vi} - \cos \alpha_{vs} \sin \alpha_{vi} \}^2 \quad (123c)$$

$$\sigma_{hh} = \eta_1 \{ \cos \varphi_s \sin \alpha_{vs} \sin \alpha_{vi} + \cos \alpha_{vs} \cos \alpha_{vi} \}^2 \quad (123d)$$

Les angles α_{vi} et α_{vs} sont les angles qui effectuent une rotation par rapport aux polarisations verticales incidentes \hat{v}_i et diffusées \hat{v}_s dans le sens inverse de aiguilles d'une montre jusqu'à la polarisation

perpendiculaire au plan de diffusion donné au § 5.3.3. Le plan de diffusion des gouttes de pluie est le plan formé par la direction de l'incidence et la direction de diffusion.

L'angle α_{vi} est donné par:

$$\alpha_{vi} = \tan^{-1} \left\{ \frac{(h_0+z)((x_0+\rho \cos \varphi)(x_0-d+\rho \cos \varphi) + (y_0+\rho \sin \varphi)^2) - d_{B1}^2(h_0-h_2+z)}{r_{A1}d(y_0+\rho \sin \varphi)} \right\} \quad (124)$$

L'angle de rotation α_{vs} est donné par:

$$\alpha_{vs} = \cos^{-1} \{ -\sin \alpha_{vi} (\hat{h}_{A1} \cdot \hat{v}_{A2}) + \cos \alpha_{vi} (\hat{v}_{A1} \cdot \hat{v}_{A2}) \} \quad (125)$$

avec

$$(\hat{h}_{A1} \cdot \hat{v}_{A2}) = \frac{\{(h_0-h_2)+z\}(y_0+\rho \sin \varphi)}{d_{B1}d_{B2}r_{A2}} d \quad (126)$$

$$(\hat{h}_{A1} \cdot \hat{v}_{A2}) = \frac{1}{d_{B1}\sqrt{1+(h_0+z-h_2)^2}} \left(-(y_0 + \rho \sin \varphi) + \frac{(x_0+\rho \cos \varphi)}{d_{B2}(h_0+z-h_2)} \right) \quad (127)$$

et

$$(\hat{v}_{A1} \cdot \hat{v}_{A2}) = \frac{d_{B1}^2 r_{A2}^2 + \{(h_0-h_2)+z\} \{h_2 d_{B1}^2 - (h_0+z)(x_0+\rho \cos \varphi)d\}}{r_{A1} d_{B1} r_{A2} d_{B2}} \quad (128)$$

$$(\hat{v}_{A1} \cdot \hat{v}_{A2}) = \frac{1}{1+(h_0+z-h_2)^2} \left(1 + \frac{1}{d_{B1}^2(h_0+z-h_1)^2} + \frac{d_{B2}^2 r_2^2}{(h_0+z-h_2)^2} \right) \quad (129)$$

5.3.5 Étape 5: Intégration de la fonction de transfert de diffusion

L'intégration de la fonction de transfert de diffusion (équation (103)) peut être effectuée au moyen d'une technique d'intégration numérique adaptée, par exemple la méthode de quadrature de Legendre-Gauss appliquée ci-dessous.

5.3.5.1 Intégration au moyen de la méthode de quadrature de Legendre-Gauss

Pour appliquer la méthode de quadrature de Legendre-Gauss, le changement de variables suivant est utilisé:

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{\rho_{max}}{2} (\chi + 1) \\ \varphi &= \pi(\eta + 1) \\ z &= \frac{(z_{max}-z_{min})}{2} \varsigma + \frac{(z_{max}+z_{min})}{2} \end{aligned} \quad (131)$$

avec $-1 \leq \chi, \eta, \varsigma \leq 1$.

En introduisant l'équation (131) dans les équations (103-104) et en utilisant la quadrature de Legendre-Gauss, on obtient:

$$C_{pq} = \sum_{n=1}^{M_3} \mathcal{H}_n \quad (132)$$

$$\mathcal{H}_n = \frac{\pi(z_{max}-z_{min})d_c^2}{4} w_n \sum_{i=1}^{M_1} w_i \sum_{j=1}^{M_2} w_j \mathcal{F}_{ijn}(\chi_i, \eta_j, \varsigma_n) \quad (133)$$

NOTE – $\mathcal{F}_{ijn}(\chi_i, \eta_j, \varsigma_n) \rightarrow \mathcal{F}(\rho, \varphi, z)$ via l'équation (104).

M_1, M_2 et M_3 sont les nombres totaux de points d'intégration. De plus, χ_i ($i = 1, \dots, M_1$), η_j ($j = 1, \dots, M_2$), et ς_n ($n = 1, \dots, M_3$) sont les nœuds de la quadrature gaussienne; et w_i, w_j , et w_n sont les poids correspondants donnés dans la Recommandation UIT-R P.1144.

La procédure d'intégration supposant l'utilisation des équations (131) à (133) est la suivante:

- 1) Déterminer les points de la quadrature gaussienne χ_i ($i = 1, \dots, M_1$) et η_j ($j = 1, \dots, M_2$); et les poids correspondants w_i et w_j donnés au § 5.3.7.
- 2) Introduire les points de la quadrature gaussienne dans l'équation (131) pour calculer les rayons ρ_i 's, les angles d'azimut φ_j 's et les hauteurs z_n 's compris dans le volume d'intégration.
- 3) Commencer par la couche inférieure de la cellule de pluie ($n = 1$) avec le nœud de quadrature ζ_1 et le poids w_1 .
- 4) Utiliser les rayons, les angles d'azimut et la hauteur (ρ_i, φ_j, z_1) obtenus pour calculer les valeurs des paramètres donnés dans les équations (97) à (102).
- 5) Pour chaque point, utiliser les valeurs ci-dessus pour déterminer les angles de visée hors axe (équations (116) et (117)) et donc le gain de chaque antenne, les sections efficaces bistatiques, les équations (123a) à (123d), l'affaiblissement atmosphérique (équation (118)) et l'affaiblissement dû à la pluie (équation (119)).
- 6) Utiliser les résultats de la procédure 5) pour calculer la fonction correspondante $\mathcal{F}_{ij1}(\chi_i, \eta_j, \zeta_1)$ donnée dans l'équation (104).
- 7) Multiplier chaque fonction $\mathcal{F}_{ij1}(\chi_i, \eta_j, \zeta_1)$ par les poids gaussiens correspondants (w_i, w_j , et w_1).
- 8) Additionner toutes les valeurs de la fonction $\mathcal{F}_{ij1}(\chi_i, \eta_j, \zeta_1)$ et multiplier le résultat par $\frac{\pi(z_{max}-z_{min})d_c^2}{4}$, ce qui permet d'obtenir \mathcal{H}_1 comme dans l'équation (133) avec $n = 1$.
- 9) Répéter les étapes 1 à 8 en augmentant l'ordre de n de 1 ($n = 1, \dots, M_3$) pour obtenir toutes les valeurs de \mathcal{H}_n ($n = 1, \dots, M_3$) données dans l'équation (133).
- 10) Additionner toutes les valeurs de \mathcal{H}_n ($n = 1, \dots, M_3$) et diviser le résultat par $(r_1 r_2')^2$ pour obtenir la valeur de la fonction de transfert de diffusion C_{pq} donnée dans l'équation (132).

5.3.6 Tableaux relatifs au § 5.3.1.2

TABLEAU 6

Valeurs des coefficients c_i^m ($i = 0, 1, 2$) de l'équation (86)

m	c_0^m	c_1^m	c_2^m
0	0,86481	0,0025984	-3,2727e-05
1	-0,32507	-0,025593	0,00040852
2	0,70075	0,041632	-0,00084479
3	-0,4162	-0,023144	0,00063446
4	0,11971	0,0054147	-0,00022071
5	-0,018495	-0,00049312	3,6339e-05
6	0,0012143	8,1571e-06	-2,2949e-06

TABLEAU 7

Valeurs des coefficients d_i^m ($i = 0, 1, 2$) de l'équation (87)

m	d_0	d_1	d_2
0	-9,2859	-0,026677	7,4162e-05
1	1,5977	-0,021172	0,001127
2	0,45627	-0,0010862	-0,0014558
3	-0,15347	0,016763	0,00066036
4	0,040141	-0,0062665	-0,00012758
5	-0,0049951	0,00064387	8,9007e-06

5.3.7 Tableaux relatifs au § 5.3.2

TABLEAU 8

Valeurs des coefficients $c_0^{0,0,m}$, $c_1^{0,0,m}$ et $c_2^{0,0,m}$ pour $b_{0,m}^0$ de l'équation (94) dans le cas de a_0^0 de l'équation (92)

m	c_0	c_1	c_2
0	-23,033	-0,019039	-1,3511e-07
1	1,0988	0,0057909	-1,8732e-05
2	-0,053826	-0,00051258	2,8893e-06
3	0,0017167	2,0326e-05	-1,5242e-07
4	-3,3231e-05	-4,2625e-07	3,8089e-09
5	3,7396e-07	4,9297e-09	-4,969e-11
6	-2,2438e-09	-2,9763e-11	3,2787e-13
7	5,5409e-12	7,3317e-14	-8,6497e-16

TABLEAU 9

Valeurs des coefficients $c_0^{0,1,m}$, $c_1^{0,1,m}$ et $c_2^{0,1,m}$ pour $b_{1,m}^0$ de l'équation (94) dans le cas de a_1^0 de l'équation (92)

m	$c_0^{0,1,m}$	$c_1^{0,1,m}$	$c_2^{0,1,m}$
0	1,758	0,0078061	-0,00019642
1	-0,034774	-0,0010409	4,8582e-05
2	0,0031934	1,2441e-05	-3,9051e-06
3	-0,00014758	1,6661e-06	1,5195e-07
4	3,3014e-06	-7,0142e-08	-3,2085e-09
5	-3,8772e-08	1,1439e-09	3,7652e-11
6	2,3188e-10	-8,5799e-12	-2,3101e-13
7	-5,5887e-13	2,4612e-14	5,779e-16

TABLEAU 10

Valeurs des coefficients $c_0^{0,2,m}$, $c_1^{0,2,m}$ et $c_2^{0,2,m}$ pour $b_{2,m}^0$ de l'équation (94)
dans le cas de a_2^0 de u_0 de l'équation (92)

m	$c_0^{0,2,m}$	$c_1^{0,2,m}$	$c_2^{0,2,m}$
0	-0,051224	0,00081531	1,1534e-05
1	0,0011587	-0,00031961	-2,3173e-06
2	-8,8754e-05	3,5484e-05	1,4933e-07
3	9,6328e-07	-1,6609e-06	-4,7112e-09
4	5,927e-08	3,9523e-08	8,0972e-11
5	-1,6618e-09	-5,0408e-10	-7,7464e-13
6	1,5626e-11	3,2862e-12	3,8749e-15
7	-5,0972e-14	-8,6057e-15	-7,8859e-18

TABLEAU 11

Valeurs des coefficients $c_0^{1,0,m}$, $c_1^{1,0,m}$ et $c_2^{1,0,m}$ pour $b_{0,m}^1$ de l'équation (94)
dans le cas de a_0^1 de u_1 de l'équation (92)

m	$c_0^{1,0,m}$	$c_1^{1,0,m}$	$c_2^{1,0,m}$
0	0,28927	0,037271	-0,00010078
1	-0,11742	-0,011059	6,6665e-05
2	0,010231	0,00093297	-8,6068e-06
3	-0,00041831	-3,5477e-05	4,2065e-07
4	8,8529e-06	7,2358e-07	-1,0192e-08
5	-1,0313e-07	-8,2014e-09	1,3111e-10
6	6,2591e-10	4,8736e-11	-8,5865e-13
7	-1,5469e-12	-1,1849e-13	2,2546e-15

TABLEAU 12

Valeurs des coefficients $c_0^{1,1,m}$, $c_1^{1,1,m}$ et $c_2^{1,1,m}$ pour $b_{1,m}^1$ de l'équation (94)
dans le cas de a_1^1 de u_1 de l'équation (92)

m	$c_0^{1,1,m}$	$c_1^{1,1,m}$	$c_2^{1,1,m}$
0	-0,2317	-0,005093	0,00045796
1	0,020016	-0,00076558	-0,00011298
2	0,00060157	0,00020785	9,1237e-06
3	-9,7303e-05	-1,2384e-05	-3,5392e-07
4	3,2711e-06	3,3064e-07	7,4324e-09
5	-5,0187e-08	-4,5084e-09	-8,6694e-11
6	3,6714e-10	3,0694e-11	5,2868e-13
7	-1,0386e-12	-8,2853e-14	-1,3148e-15

TABLEAU 13

Valeurs des coefficients $c_0^{1,2,m}$, $c_1^{1,2,m}$ et $c_2^{1,2,m}$ pour $b_{2,m}^1$ de l'équation (94)
dans le cas de a_2^1 de u_1 de l'équation (92)

m	$c_0^{1,2,m}$	$c_1^{1,2,m}$	$c_2^{1,2,m}$
0	-0,036841	-0,0025519	-2,6162e-05
1	0,012953	0,00084793	5,2688e-06
2	-0,001305	-8,5265e-05	-3,3134e-07
3	5,9518e-05	3,7912e-06	9,6604e-09
4	-1,454e-06	-8,7204e-08	-1,4711e-10
5	1,91e-08	1,085e-09	1,1752e-12
6	-1,2719e-10	-6,9419e-12	-4,3973e-15
7	3,3748e-13	1,7914e-14	5,0804e-18

TABLEAU 14

Valeurs des coefficients $c_0^{2,0,m}$, $c_1^{2,0,m}$ et $c_2^{2,0,m}$ pour $b_{0,m}^2$ de l'équation (94)
dans le cas de a_0^2 de u_2 de l'équation (92)

m	$c_0^{2,0,m}$	$c_1^{2,0,m}$	$c_2^{2,0,m}$
0	-0,0022144	-0,0014792	0,00030493
1	-0,008123	-0,00055742	-8,8598e-05
2	0,0018507	0,00015755	8,3245e-06
3	-8,484e-05	-8,944e-06	-3,572e-07
4	1,9127e-06	2,323e-07	7,9876e-09
5	-2,2827e-08	-3,1221e-09	-9,6893e-11
6	1,4148e-10	2,1074e-11	6,0585e-13
7	-3,5797e-13	-5,6545e-14	-1,5317e-15

TABLEAU 15

Valeurs des coefficients $c_0^{2,1,m}$, $c_1^{2,1,m}$ et $c_2^{2,1,m}$ pour $b_{1,m}^2$ de l'équation (94)
dans le cas de a_1^2 de u_2 de l'équation (92)

m	$c_0^{2,1,m}$	$c_1^{2,1,m}$	$c_2^{2,1,m}$
0	-0,048207	-0,019603	3,8001e-06
1	-0,00041118	0,0045669	-1,0444e-05
2	0,0016887	-0,00031651	1,7242e-06
3	-0,00011195	1,0267e-05	-1,0534e-07
4	3,0478e-06	-1,776e-07	2,9975e-09
5	-4,1397e-08	1,6755e-09	-4,3294e-11
6	2,8014e-10	-8,0718e-12	3,0902e-13
7	-7,5246e-13	1,5353e-14	-8,6683e-16

TABLEAU 16

Valeurs des coefficients $c_0^{2,2,m}$, $c_1^{2,2,m}$ et $c_2^{2,2,m}$ pour $b_{2,m}^2$ de l'équation (94)
dans le cas de a_2^2 de u_2 de l'équation (92)

m	$c_0^{2,2,m}$	$c_1^{2,2,m}$	$c_2^{2,2,m}$
0	-0,1208	-0,0018073	-7,7431e-05
1	0,039712	0,00099445	2,2037e-05
2	-0,0039312	-0,00012817	-2,1388e-06
3	0,00017579	6,5734e-06	9,7426e-08
4	-4,0495e-06	-1,669e-07	-2,3253e-09
5	5,0716e-08	2,2341e-09	3,0006e-11
6	-3,2704e-10	-1,512e-11	-1,9832e-13
7	8,496e-13	4,0796e-14	5,2636e-16

TABLEAU 17

Valeurs des coefficients $c_0^{2,3,m}$, $c_1^{2,3,m}$ et $c_2^{2,3,m}$ pour $b_{3,m}^2$ de l'équation (94)
dans le cas de a_3^2 de u_2 de l'équation (92)

m	$c_0^{2,3,m}$	$c_1^{2,3,m}$	$c_2^{2,3,m}$
0	0,02176	0,0005804	9,4104e-06
1	-0,0067089	-0,00020457	-2,5829e-06
2	0,0006556	2,156e-05	2,4395e-07
3	-2,966e-05	-9,9711e-07	-1,0876e-08
4	6,9633e-07	2,3723e-08	2,5604e-10
5	-8,7919e-09	-3,0371e-10	-3,2742e-12
6	5,6633e-11	1,9905e-12	2,15e-14
7	-1,462e-13	-5,2428e-15	-5,6776e-17

TABLEAU 18

Valeurs des coefficients $c_0^{3,0,m}$, $c_1^{3,0,m}$ et $c_2^{3,0,m}$ pour $b_{0,m}^3$ de l'équation (94)
dans le cas de a_0^3 de u_3 de l'équation (92)

m	$c_0^{3,0,m}$	$c_1^{3,0,m}$	$c_2^{3,0,m}$
0	-0,046298	-0,0057663	-0,00018642
1	0,01272	0,0017156	4,8813e-05
2	-0,0010278	-0,0001572	-4,0434e-06
3	3,4667e-05	6,2343e-06	1,5655e-07
4	-6,1228e-07	-1,3209e-07	-3,2237e-09
5	5,8573e-09	1,5529e-09	3,65e-11
6	-2,9595e-11	-9,5349e-12	-2,1505e-13
7	6,2019e-14	2,3843e-14	5,1597e-16

TABLEAU 19

Valeurs des coefficients $c_0^{3,1,m}$, $c_1^{3,1,m}$ et $c_2^{3,1,m}$ pour $b_{1,m}^3$ de l'équation (94)
dans le cas de a_1^3 de u_3 de l'équation (92)

m	$c_0^{3,1,m}$	$c_1^{3,1,m}$	$c_2^{3,1,m}$
0	-0,15558	-0,0042536	-9,7633e-05
1	0,047606	0,0017754	3,2832e-05
2	-0,0046542	-0,00020881	-3,4242e-06
3	0,00020312	1,0088e-05	1,6314e-07
4	-4,6089e-06	-2,4592e-07	-4,0092e-09
5	5,6717e-08	3,2014e-09	5,2747e-11
6	-3,5983e-10	-2,1241e-11	-3,5329e-13
7	9,2209e-13	5,6467e-14	9,4664e-16

TABLEAU 20

Valeurs des coefficients $c_0^{3,2,m}$, $c_1^{3,2,m}$ et $c_2^{3,2,m}$ pour $b_{2,m}^3$ de l'équation (94)
dans le cas de a_2^3 de u_3 de l'équation (92)

m	$c_0^{3,2,m}$	$c_1^{3,2,m}$	$c_2^{3,2,m}$
0	0,11087	0,0061252	5,7319e-05
1	-0,029622	-0,0017355	-1,5993e-05
2	0,0025942	0,00016036	1,5228e-06
3	-0,00010795	-6,8539e-06	-6,7714e-08
4	2,3816e-06	1,5498e-07	1,5828e-09
5	-2,8856e-08	-1,9149e-09	-2,0088e-11
6	1,8081e-10	1,2223e-11	1,3102e-13
7	-4,5761e-13	-3,1539e-14	-3,4402e-16

TABLEAU 21

Valeurs des coefficients $c_0^{3,3,m}$, $c_1^{3,3,m}$ et $c_2^{3,3,m}$ pour $b_{3,m}^3$ de l'équation (94)
dans le cas de a_3^3 de u_3 de l'équation (92)

m	$c_0^{3,3,m}$	$c_1^{3,3,m}$	$c_2^{3,3,m}$
0	-0,015838	-0,00071563	-6,1847e-06
1	0,0042926	0,00019142	1,6456e-06
2	-0,00039171	-1,6809e-05	-1,5321e-07
3	1,6946e-05	6,9046e-07	6,7237e-09
4	-3,8371e-07	-1,5112e-08	-1,5611e-10
5	4,6824e-09	1,8183e-10	1,9738e-12
6	-2,9185e-11	-1,1361e-12	-1,2841e-14
7	7,3004e-14	2,8813e-15	3,3644e-17

Pièce jointe 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 la présente Pièce jointe.

2 Cartes donnant la variation verticale des données du coïndice et le coïndice à la surface de la Terre

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. La valeur moyenne du coïndice de réfraction au niveau de la mer, N_0 , est utilisée pour le calcul du modèle de diffusion troposphérique.

Si des mesures locales ne sont pas disponibles, ces grandeurs peuvent être déterminées à partir des cartes figurant dans les produits numériques fournis en tant que partie intégrante de la présente Recommandation dans le fichier zip UIT-R P.452. Ces cartes numériques, obtenues à partir de l'analyse d'un ensemble de données recueillies dans le monde entier sur dix ans (1983-1992) par radiosondage, figurent dans les fichiers DN50.txt et N050.txt, respectivement. Les données vont de 0° à 360° en longitude et de $+90^\circ$ à -90° en latitude, avec une résolution de $1,5^\circ$ en latitude et en longitude. Ces données sont utilisées avec les fichiers de données associés LAT.txt et LON.txt, qui contiennent les latitudes et les longitudes des entrées correspondantes (points de la grille) des fichiers DN50.txt et N050.txt. Pour un emplacement différent des emplacements correspondant aux points de la grille, le paramètre à l'emplacement voulu peut être calculé par interpolation bilinéaire à partir des valeurs aux quatre points de la grille les plus proches, comme décrit dans la Recommandation UIT-R P.1144.

Pièce jointe 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 22.

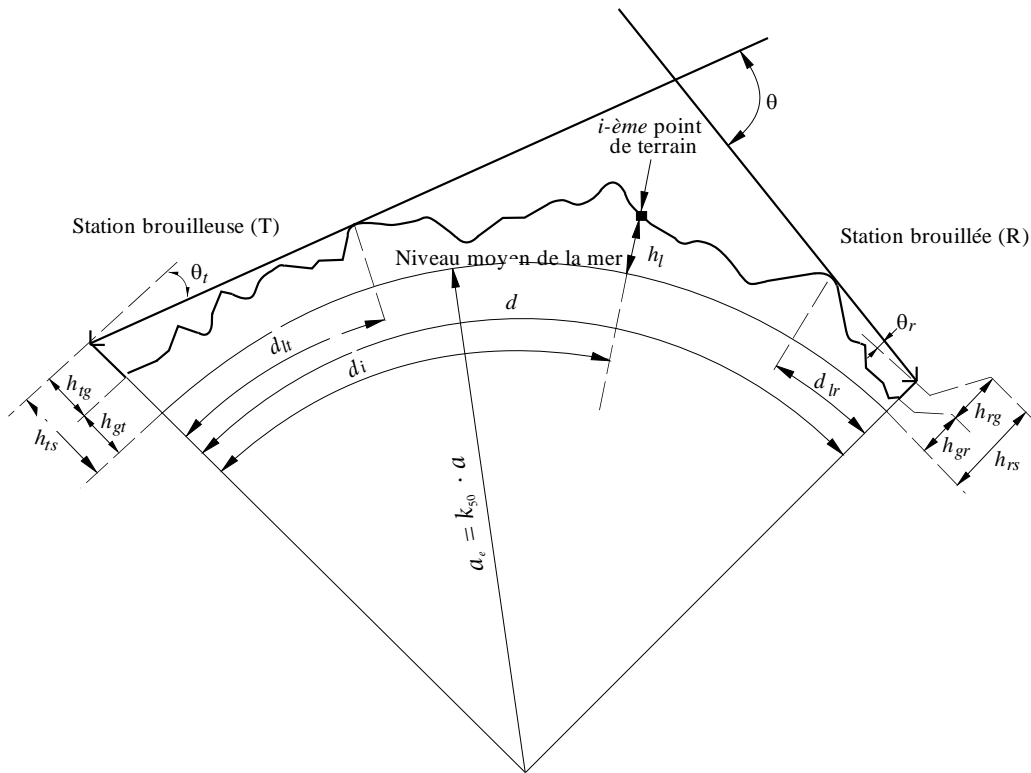
2 Établissement du profil du trajet

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 Figure 7 illustre un exemple de profil des hauteurs a-dnm de terrain sur le trajet a-dnm ainsi que les divers paramètres relatifs aux terrains utilisés.

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



P.0452-07

Note – La valeur θ_i ainsi représentée est négative.

Le Tableau 22 définit les paramètres utilisés ou obtenus lors de l'analyse de profil du trajet.

TABLEAU 22
Définition des paramètres du profil du trajet

Paramètre	Description
a	Rayon terrestre physique moyen (6 371 km)
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 -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_i	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 en direction de l'antenne de la station brouillée

TABLEAU 22 (*fin*)

Paramètre	Description
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 en direction 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 -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 (c'est-à-dire en fonction du rayon terrestre physique moyen a), 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:

$$d = \sum_{i=1}^n (d_i - d_{i-1}) \quad \text{km} \quad (134)$$

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

$$d = n \cdot d_{ii} \quad \text{km} \quad (135)$$

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:

$$\theta_{max} > \theta_{td} \quad \text{mrad} \quad (136)$$

où:

$$\theta_{max} = \max_{i=1}^{n-1} (\theta_i) \quad \text{mrad} \quad (137)$$

θ_i : angle d'élévation vers le i -ème point du terrain

$$\theta_i = 1000 \arctan \left(\frac{h_i - h_{ts}}{10^3 d_i} - \frac{d_i}{2a_e} \right) \quad \text{mrad} \quad (138)$$

où:

h_i : hauteur a-dnm (m) du i -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 -ème point du terrain (km)

$$\theta_{td} = 1000 \arctan \left(\frac{h_{rs} - h_{ts}}{10^3 d} - \frac{d}{2a_e} \right) \quad \text{mrad} \quad (139)$$

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 et trajets LoS

La liste complète des paramètres à établir à partir de l'analyse du profil du trajet est donnée dans le Tableau 22.

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

$$\theta_t = \max(\theta_{max}, \theta_{td}) \quad \text{mrad} \quad (140)$$

θ_{max} étant déterminé comme dans l'équation (137). Ainsi, pour un trajet LoS, l'angle d'élévation de l'antenne d'émission est considéré comme étant l'angle d'élévation de la direction de l'antenne brouillée.

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

La distance de l'horizon de l'antenne brouilleuse est la distance minimale depuis l'émetteur correspondant à l'angle d'élévation maximal de l'horizon de l'antenne calculé à l'aide de la formule (137).

$$d_{lt} = d_i \quad \text{km} \quad \text{pour max} (\theta_i) \quad (141)$$

Pour un trajet LoS, la valeur de l'indice i doit être celle pour laquelle la valeur du paramètre de diffraction v est maximale:

$$v_{max} = \max \left\{ \left[h_i + 500 C_e d_i (d - d_i) - \frac{h_{ts}(d - d_i) + h_{rs} d_i}{d} \right] \sqrt{\frac{0.002d}{\lambda d_i (d - d_i)}} \right\} \quad (141a)$$

où l'indice du profil i prend des valeurs comprises entre 1 et $n - 1$, et C_e est la courbure équivalente de la Terre définie au § 4.2.1 de l'Annexe 1.

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

Pour un trajet LoS, θ_r est donné par:

$$\theta_r = 1000 \arctan \left(\frac{h_{ts} - h_{rs}}{10^3 d} - \frac{d}{2a_e} \right) \quad \text{mrad} \quad (142a)$$

Sinon, θ_r est donné par:

$$\theta_r = \max_{j=1}^{n-1} (\theta_j) \quad \text{mrad} \quad (142b)$$

$$\theta_j = 1000 \arctan \left(\frac{h_j - h_{rs}}{10^3 (d - d_j)} - \frac{d - d_j}{2a_e} \right) \quad \text{mrad} \quad (143)$$

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 (142b).

$$d_{lr} = d - d_j \quad \text{km} \quad \text{pour max } (\theta_j) \quad (144)$$

Pour un trajet LoS, d_{lr} est donné par:

$$d_{lr} = d - d_{lt} \quad \text{km} \quad (144a)$$

5.1.5 Distance angulaire, θ (mrad)

$$\theta = \frac{10^3 d}{a_e} + \theta_t + \theta_r \quad \text{mrad} \quad (145)$$

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

5.1.6.1 Généralités

On obtient une surface «Terre régulière» à partir du profil afin de calculer les hauteurs équivalentes des antennes à la fois pour le modèle de diffraction et pour l'évaluation de l'irrégularité du terrain dont on a besoin pour le modèle de conduits/réflexion sur les couches. Les définitions des hauteurs équivalentes des antennes sont différentes dans ces deux cas.

La Section 5.1.6.2 décrit le calcul des hauteurs non corrigées pour une surface de Terre régulière au niveau de l'émetteur et du récepteur, h_{st} et h_{sr} respectivement.

Puis le § 5.1.6.3 décrit la dérivation des hauteurs modifiées de Terre régulière à l'émetteur et au récepteur pour le modèle de diffraction, respectivement h_{std} et h_{srd} , lesquelles, au § 4.2.3 de l'Annexe 1, sont utilisées pour calculer des hauteurs équivalentes des antennes pour le modèle de diffraction.

La Section 5.1.6.4 décrit le calcul des hauteurs équivalentes h_{te} et h_{re} et du paramètre d'irrégularité du terrain, h_m , pour le modèle de conduits.

5.1.6.2 Calcul de la surface de la Terre régulière

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

$$h_{si} = [(d - d_i)h_{st} + d_i h_{sr}] / d \quad \text{m} \quad (146)$$

où:

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

Évaluer h_{st} et h_{sr} comme suit en utilisant les formules (147) à (150):

$$v_1 = \sum_{i=1}^n (d_i - d_{i-1})(h_i + h_{i-1}) \quad (147)$$

où:

- h_i : hauteur vraie au-dessus du niveau moyen de la mer du i -ème point du terrain (m)
- d_i : distance de la station brouilleuse au i -ème point du terrain (km).

$$v_2 = \sum_{i=1}^n (d_i - d_{i-1}) [h_i(2d_i + d_{i-1}) + h_{i-1}(d_i + 2d_{i-1})] \quad (148)$$

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

$$h_{st} = \left(\frac{2v_1 d - v_2}{d^2} \right) \quad \text{m} \quad (149)$$

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

$$h_{sr} = \left(\frac{v_2 - v_1 d}{d^2} \right) \quad \text{m} \quad (150)$$

5.1.6.3 Hauteurs de surface de la Terre régulière pour le modèle de diffraction

Trouver la hauteur de l'obstacle le plus élevé au-dessus du trajet en ligne droite de l'émetteur au récepteur h_{obs} et les angles d'élévation de l'horizon α_{obt} , α_{obr} , sur la base d'une géométrie pour une Terre plate:

$$h_{obs} = \max_{i=1}^{n-1} \{H_i\} \quad \text{m} \quad (151a)$$

$$\alpha_{obt} = \max_{i=1}^{n-1} \{H_i / d_i\} \quad \text{mrad} \quad (151b)$$

$$\alpha_{obr} = \max_{i=1}^{n-1} \{H_i / (d - d_i)\} \quad \text{mrad} \quad (151c)$$

où:

$$H_i = h_i - [h_{ts}(d - d_i) + h_{rs}d_i] / d \quad \text{m} \quad (151d)$$

Calculer les valeurs provisoires des hauteurs de la surface régulière à l'extrémité émetteur et l'extrémité récepteur du trajet:

Si $h_{obs} \leq 0$, alors:

$$h_{stp} = h_{st} \quad (\text{m}) \text{ a-dnm} \quad (152a)$$

$$h_{srp} = h_{sr} \quad (\text{m}) \text{ a-dnm} \quad (152b)$$

sinon:

$$h_{stp} = h_{st} - h_{obs}g_t \quad (\text{m}) \text{ a-dnm} \quad (152c)$$

$$h_{srp} = h_{sr} - h_{obs}g_r \quad (\text{m}) \text{ a-dnm} \quad (152d)$$

où:

$$g_t = \alpha_{obt} / (\alpha_{obt} + \alpha_{obr}) \quad (152e)$$

$$g_r = \alpha_{obr} / (\alpha_{obt} + \alpha_{obr}) \quad (152f)$$

Calculer les valeurs finales des hauteurs de la surface régulière à l'extrémité émetteur et l'extrémité récepteur du trajet, dont on a besoin pour le modèle de diffraction:

Si h_{stp} est supérieure à h_0 alors:

$$h_{std} = h_0 \quad (\text{m}) \text{ a-dnm} \quad (153a)$$

sinon:

$$h_{std} = h_{stp} \quad (\text{m}) \text{ a-dnm} \quad (153b)$$

Si h_{srp} est supérieure à h_n alors:

$$h_{srd} = h_n \quad (\text{m}) \text{ a-dnm} \quad (153c)$$

sinon:

$$h_{srd} = h_{srp} \quad (\text{m}) \text{ a-dnm} \quad (153d)$$

5.1.6.4 Paramètres pour le modèle de formation de conduits/réflexion sur les couches

Calculer les hauteurs, pour une Terre régulière, au niveau de l'émetteur et du récepteur dont on a besoin pour le paramètre d'irrégularité du terrain:

$$h_{st} = \min(h_{st}, h_0) \quad \text{m} \quad (154a)$$

$$h_{sr} = \min(h_{sr}, h_n) \quad \text{m} \quad (154b)$$

Si l'une de ces deux hauteurs ou les deux ont dû être corrigées à l'aide des équations (154a) ou (154b), il faut également corriger la valeur de la pente m par la formule:

$$m = \frac{h_{sr} - h_{st}}{d} \quad \text{m/km} \quad (155)$$

Les hauteurs équivalentes des terminaux pour le modèle de formation de conduits/réflexion sur les couches, h_{te} et h_{re} , sont données par:

$$\begin{aligned} h_{te} &= h_{tg} + h_0 - h_{st} & \text{m} \\ h_{re} &= h_{rg} + h_n - h_{sr} & \text{m} \end{aligned} \quad (156)$$

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

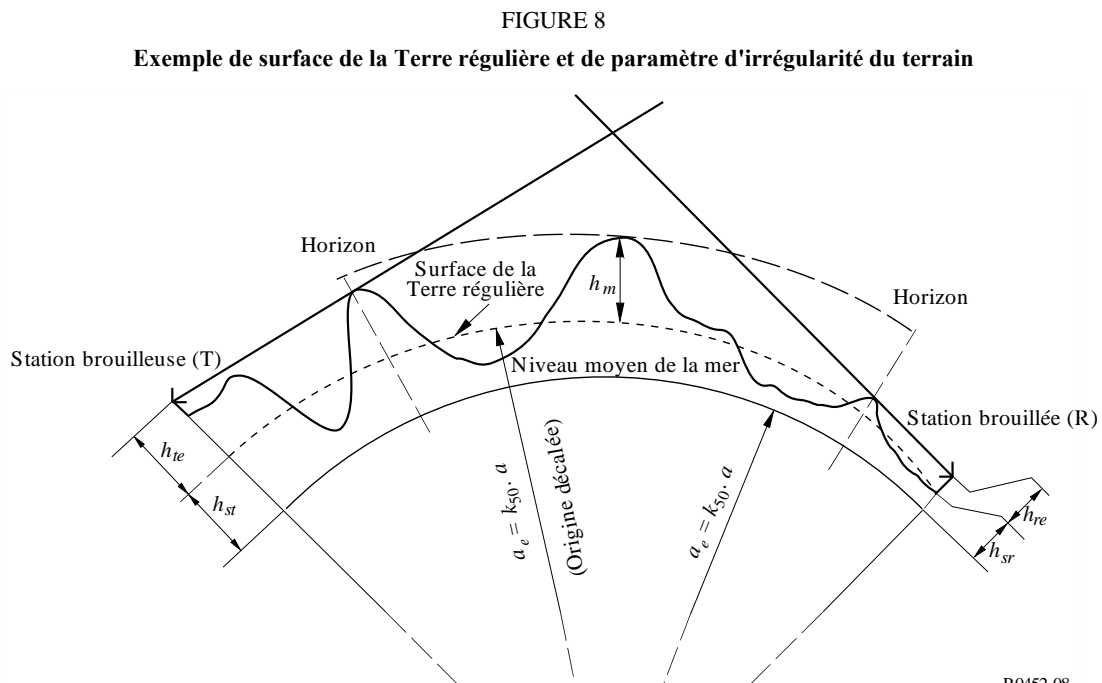
$$h_m = \max_{i=i_{lt}}^{i_{lr}} \left[h_i - (h_{st} + m \cdot d_i) \right] \quad \text{m} \quad (157)$$

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. 8.



Pièce jointe 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 (41). 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:

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

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

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

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

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

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

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

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