

# UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

**Recommandation UIT-R P.452-16**  
(07/2015)

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

**Série P**  
**Propagation des ondes radioélectriques**



## Avant-propos

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

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

## Politique en matière de droits de propriété intellectuelle (IPR)

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

### Séries des Recommandations UIT-R

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

Séries	Titre
<b>BO</b>	Diffusion par satellite
<b>BR</b>	Enregistrement pour la production, l'archivage et la diffusion; films pour la télévision
<b>BS</b>	Service de radiodiffusion sonore
<b>BT</b>	Service de radiodiffusion télévisuelle
<b>F</b>	Service fixe
<b>M</b>	Services mobile, de radiorepérage et d'amateur y compris les services par satellite associés
<b>P</b>	<b>Propagation des ondes radioélectriques</b>
<b>RA</b>	Radio astronomie
<b>RS</b>	Systèmes de télédétection
<b>S</b>	Service fixe par satellite
<b>SA</b>	Applications spatiales et météorologie
<b>SF</b>	Partage des fréquences et coordination entre les systèmes du service fixe par satellite et du service fixe
<b>SM</b>	Gestion du spectre
<b>SNG</b>	Reportage d'actualités par satellite
<b>TF</b>	Emissions de fréquences étalon et de signaux horaires
<b>V</b>	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, 2016

© UIT 2016

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.452-16\*

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

(Question UIT-R 208/3)

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

**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 0,1 GHz 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

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 0,1 GHz.

---

\* La Commission d'études 3 des radiocommunications a apporté des modifications rédactionnelles à la présente Recommandation en 2016 conformément aux dispositions de la Résolution UIT-R 1.

## Annexe 1

### 1 Introduction

L'encombrement du spectre radioélectrique rend nécessaire le partage d'un grand nombre de bandes de fréquences entre différents services radioélectriques et entre les différents opérateurs de services radioélectriques similaires. Pour assurer une coexistence satisfaisante des systèmes de Terre et des systèmes Terre vers espace concernés, il est important de pouvoir calculer avec une précision suffisante les niveaux de brouillage mutuel possible en utilisant des 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 Recommandation UIT-R P.452 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 Recommandation UIT-R P.452 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

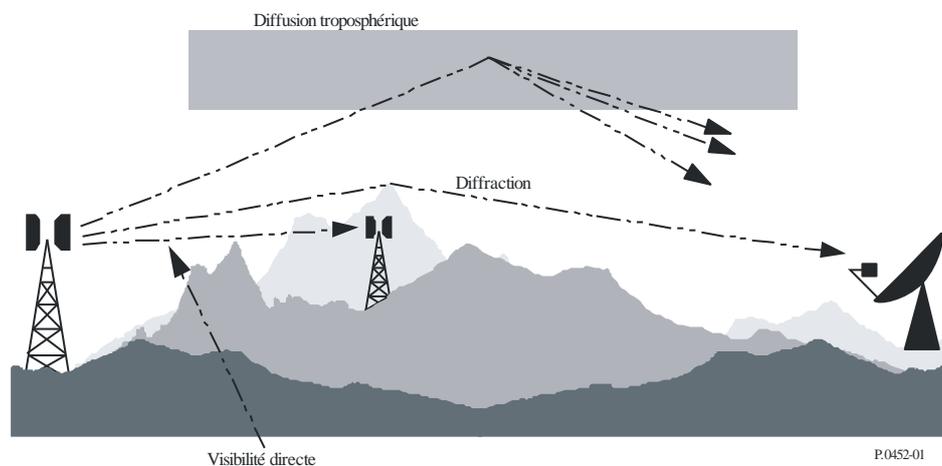
Le brouillage fait intervenir un certain nombre de mécanismes de propagation dont l'importance relative dépend du climat, de la fréquence, du pourcentage de temps considéré, de la longueur et de la topographie du trajet. A un instant quelconque, on peut avoir affaire à un ou plusieurs mécanismes. Les 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) ou terrain irrégulier (non structuré).
- *Diffusion troposphérique* (Fig. 1): Ce mécanisme définit le niveau de brouillage ambiant pour de longs trajets (par exemple, plus de 100-150 km), sur lesquels le champ de diffraction devient très faible. Cependant, sauf dans un petit nombre de cas particuliers mettant en jeu des 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.

FIGURE 1

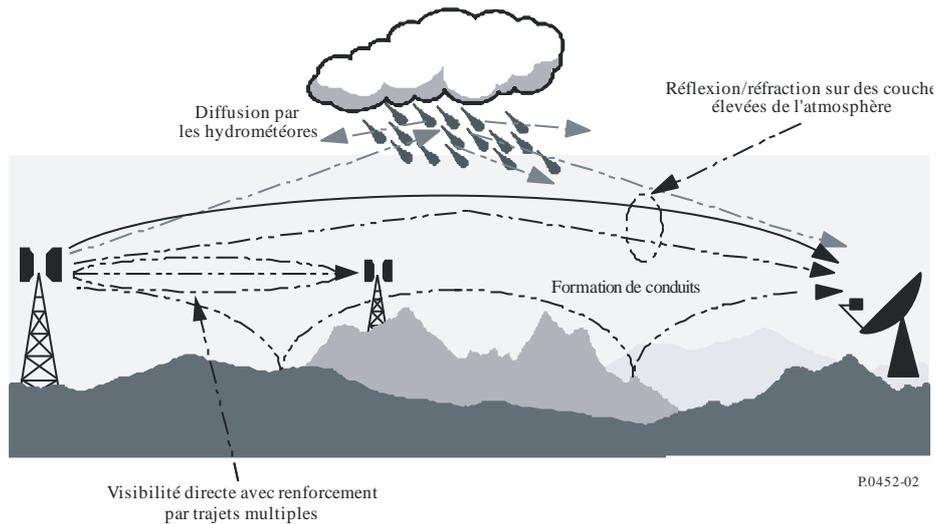
## Mécanismes de propagation des brouillages à long terme



- *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)



- *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 oeuvre par chacun des trois modèles, dont les résultats sont ensuite mis en commun, la méthode de prédiction prend en compte cinq types principaux de mécanismes de propagation:

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

#### 3.2 Elaboration d'une prédiction

##### 3.2.1 Exposé de la procédure

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

*Etape 1: Données d'entrée*

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

TABLEAU 1  
Principales données d'entrée

Paramètre	Résolution préférée	Description
$f$	0,01	Fréquence (GHz)
$p$	0,001	Pourcentage(s) de temps requis pendant lequel l'affaiblissement de propagation calculé n'est pas dépassé
$\varphi_t, \varphi_r$	0,001	Latitude de la station (degrés)
$\psi_t, \psi_r$	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).

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

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

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

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

où:

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

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

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

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

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

*Etape 3: Données radiométéorologiques*

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

- $\Delta N$  (unités N/km), gradient moyen de l'indice de réfraction radioélectrique dans le premier kilomètre de l'atmosphère, permet de déterminer le rayon équivalent de la Terre à utiliser pour l'analyse du profil de trajet et de la diffraction par les obstacles. On notera que  $\Delta N$  est une grandeur positive dans cette procédure.
- Le paramètre  $\beta_0$  (%), pourcentage du temps pendant lequel on peut s'attendre, dans les 100 premiers mètres de la basse atmosphère, à un gradient de décroissance de l'indice de réfraction supérieur à 100 unités N/km, est utilisé pour estimer l'incidence relative de la propagation totalement anormale à la latitude considérée. La valeur à utiliser pour  $\beta_0$  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  $\Delta N$  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  $\Delta N$  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,  $\beta_0$  (%), 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:

$\varphi$ : latitude du point milieu du trajet (degrés).

Le paramètre  $\mu_1$  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:

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

où la valeur de  $\mu_1$  doit être  $\leq 1$ ,

avec:

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

où:

$d_m$ : 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  $d_m$  et  $d_{lm}$  sont définies dans le Tableau 2.

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

TABLEAU 2  
Zones radioclimatiques

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

#### *Vastes étendues d'eaux intérieures*

Une «vaste» étendue d'eaux intérieures, à considérer comme faisant partie de la Zone B, est définie comme suit: zone d'aire au moins égale à 7 800 km<sup>2</sup>, 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 km<sup>2</sup>, 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 6371 km comme rayon terrestre vrai, on a pour la valeur médiane du rayon terrestre équivalent,  $a_e$ :

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

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

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

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

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

#### Etape 4: Analyse du profil du trajet

Les valeurs de certains paramètres relatifs au trajet qui sont nécessaires pour les calculs (voir le Tableau 3) doivent être obtenues à l'aide d'une analyse initiale du profil du trajet, sur la base de la valeur de  $a_e$  donnée par l'équation (6a). Les informations sur la manière d'obtenir, de construire et d'analyser le profil du trajet sont données dans la Pièce jointe 2 à l'Annexe 1.

TABLEAU 3

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

Paramètre	Description
$d$	Longueur du trajet le long du grand cercle (km)
$d_{lt}, d_{lr}$	Pour un trajet transhorizon, distance entre les antennes d'émission et de réception et leur horizon respectif (km). Pour un trajet en visibilité directe, chacun de ces paramètres correspond à la distance entre la station et le point du profil identifié comme constituant le point de Bullington dans le modèle de diffraction pendant 50% du temps.
$\theta_t, \theta_r$	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.
$\theta$	Distance angulaire du trajet (mrad)
$h_{ts}, h_{rs}$	Hauteur du centre des antennes au-dessus du niveau moyen de la mer (m)
$h_{te}, h_{re}$	Hauteurs équivalentes des antennes au-dessus du terrain (m) (voir les définitions dans la Pièce jointe 2)
$d_b$	Longueur cumulée des tronçons du trajet au-dessus d'étendues d'eau (km)
$\omega$	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 (148). Pour les trajets en totalité terrestres: $\omega = 0$
$d_{ct}, d_{cr}$	Distance terrestre entre les antennes d'émission et de réception et la côte, le long du trajet de brouillage dans le plan du grand cercle (km). Cette distance est égale à zéro pour une station sur un navire ou une plate-forme en mer

## 4 Modèles de propagation par temps clair

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

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

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

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

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

où:

$A_g$ : absorption totale par les gaz (dB):

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

où:

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

$\rho$ : concentration en vapeur d'eau:

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

$\omega$ : 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  $\beta_0$ :

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

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

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

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

L'affaiblissement de transmission de référence non dépassé pendant un pourcentage de temps  $\beta_0$ , dû à la propagation en LoS:

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

#### 4.2 Diffraction

On admet l'hypothèse suivante en ce qui concerne la diffraction: la variabilité temporelle de l'affaiblissement supplémentaire dû à la diffraction résulte des variations de la vitesse de décroissance du coïndice radioélectrique global de l'atmosphère, à savoir que le facteur multiplicatif du rayon terrestre,  $k(p)$ , augmente lorsque le pourcentage de temps  $p$  diminue. On considère que cette hypothèse est valable pour  $\beta_0 \leq p \leq 50\%$ . Pour les pourcentages de temps inférieurs à  $\beta_0$ , 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  $k_{\beta}$  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  $\beta_0$  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 § 4.6:

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

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:

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

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:

Le § 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.

Le § 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).

Le § 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».

Le § 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 du  $i$ -ème point du profil sont respectivement  $d_i$  en kilomètres et  $h_i$  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  $\lambda$ .

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

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

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:

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

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 et 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.

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

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:

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

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:

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

#### 4.2.2 Affaiblissement de diffraction pour une Terre sphérique

L'affaiblissement de diffraction pour une Terre sphérique qui n'est pas dépassé pendant  $p\%$  du temps 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:

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

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  $\omega$  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:

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

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  $\beta_{dft}$  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:

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

Définir une fonction de hauteur normalisée donnée par:

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

où:

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

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

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

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 le profil de terrain effectif 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,  $h_i$ , mises à zéro et les hauteurs d'antenne modifiées données par:

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

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

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:

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

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

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  $\beta_0$ .

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

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

où  $L_{bfs_g}$  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 (Notes 1 et 2)

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

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

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

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

où:

$L_f$ : affaiblissement en fonction de la fréquence:

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

$L_c$ : 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 mi-trajet (voir la Fig. 6)

$A_g$ : absorption par les gaz, calculée à l'aide de l'équation (9), en adoptant  $\rho = 3 \text{ g/m}^3$  pour toute la longueur du trajet.

#### 4.4 Phénomène de conduit/réflexion sur les couches

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

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

où:

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

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

$A_{lf}$  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:

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

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:

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

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

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

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

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:

$\gamma_d$ : affaiblissement linéique:

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

$\theta'$ : 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):

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

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

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

$\mu_2$ : terme correctif pour tenir compte de la géométrie du trajet:

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

La valeur de  $\mu_2$  ne doit jamais être supérieure à 1.

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

où:

$$\varepsilon = 3,5$$

$\tau$ : défini dans l'équation (3a)

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

$\mu_3$ : terme correctif pour tenir compte de l'irrégularité du terrain:

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

$$d_l = \min(d - d_{lt} - d_{lr}, 40) \quad \text{km} \quad (56a)$$

$A_g$ : 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.

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

### 4.5.1 Considérations générales

Il y a beaucoup à gagner, en termes de protection contre le brouillage, à tirer parti des affaiblissements supplémentaires par diffraction dont peuvent bénéficier les antennes englobées dans des groupes d'obstacles (clutter) locaux liés au sol (bâtiments, végétation, etc.). La méthode décrite plus loin permet l'addition de ces affaiblissements dus aux groupes d'obstacles à chaque extrémité du trajet, ou aux deux extrémités, dans des situations où le scénario d'encombrement par les obstacles est connu. Elle permet de prévoir un affaiblissement supplémentaire maximal de 20 dB à chaque extrémité du trajet, appliqué au moyen d'une fonction d'interpolation en  $S$  visant à éviter de surévaluer l'affaiblissement par effet d'écran. L'affaiblissement supplémentaire maximal est de 20 dB au-dessus de 0,9 GHz et baisse progressivement, aux fréquences inférieures, jusqu'à 5 dB à 0,16 GHz. Si on a des doutes sur la nature exacte de cet environnement, on ne prendra pas en compte cet affaiblissement supplémentaire. Lorsqu'on utilise une correction, il faut veiller à ne pas avoir d'affaiblissements importants dus à des groupes d'obstacles dans des zones urbaines composées de tours isolées séparées par des espaces plus aérés. Les affaiblissements dus à des groupes d'obstacles que l'on observe dans ces zones sont souvent faibles par rapport à ceux observés dans des centres-villes plus traditionnels où les bâtiments sont moins élevés mais plus compacts.

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

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

### 4.5.2 Catégories de groupes d'obstacles

Le Tableau 4 indique les catégories de groupes d'obstacles (ou de couverture de terrain) telles que définies dans la Recommandation UIT-R P.1058 auxquelles on peut appliquer la correction de gain de surélévation. La hauteur nominale du groupe d'obstacles,  $h_a$  (m), et la distance par rapport à l'antenne,  $d_k$  (km), sont considérées comme des valeurs «moyennes» les plus représentatives pour le type de groupes d'obstacles correspondant. Cependant, on a affecté le modèle de correction d'un certain degré de sécurité, du fait des incertitudes quant à la hauteur exacte à prendre en considération dans telle ou telle situation. Dans les cas où les paramètres du groupe d'obstacles sont connus avec plus de précision, on pourra les substituer directement aux valeurs données dans le Tableau 4.

Les hauteurs et distances nominales données au Tableau 4 sont proches de la hauteur caractéristique  $H_c$  et de la largeur de discontinuité caractéristique  $G_c$  définies dans la Recommandation UIT-R P.1058. Toutefois, le modèle utilisé ici pour évaluer les affaiblissements supplémentaires dus à l'occultation par des groupes d'obstacles (par la couverture du terrain) est affecté d'un certain degré de sécurité.

### 4.5.3 Le modèle de gain de surélévation

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

$$A_h = 10,25 F_{fc} \cdot e^{-d_k} \left( 1 - \tanh \left[ 6 \left( \frac{h}{h_a} - 0,625 \right) \right] \right) - 0,33 \quad \text{dB} \quad (57)$$

où:

$$F_{fc} = 0,25 + 0,375 \{ 1 + \tanh[7,5(f - 0,5)] \} \quad (57a)$$

où:

$d_k$ : distance (km) entre l'emplacement nominal du groupe d'obstacles et l'antenne (voir la Fig. 3)

$h$ : hauteur de l'antenne (m) au-dessus du niveau du terrain local

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

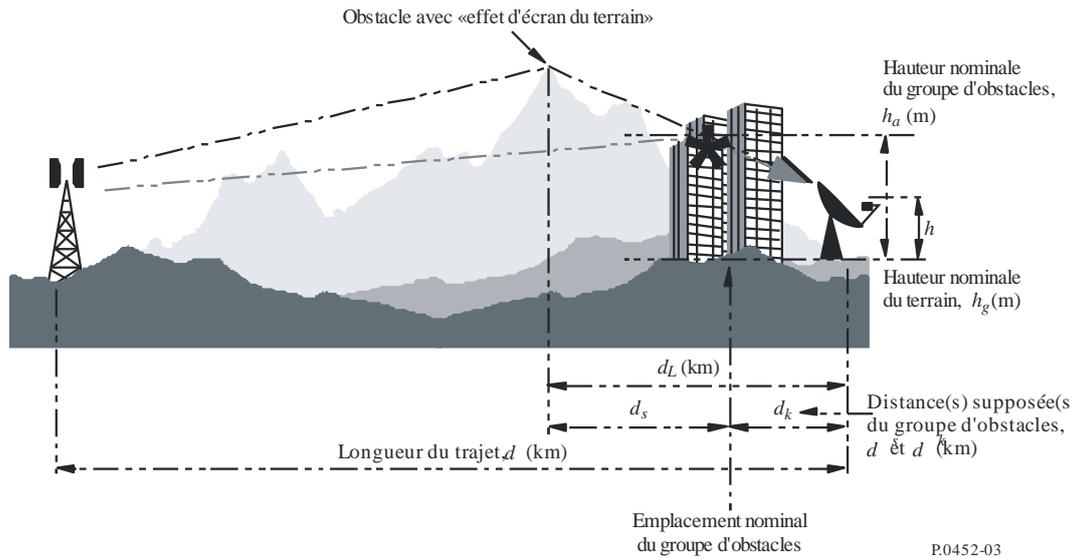
TABLEAU 4

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

Catégorie de groupes d'obstacles (ou de couverture de terrain)	Hauteur nominale, $h_a$ (m)	Distance nominale, $d_k$ (km)
Cultures hautes Parcs Couverture peu dense, irrégulière Vergers (espacement régulier) Habitat dispersé	4	0,1
Centre de village	5	0,07
Arbres à feuilles caduques (espacement irrégulier) Arbres à feuilles caduques (espacement régulier) Forêt plantée de diverses essences	15	0,05
Conifères (espacement irrégulier) Conifères (espacement régulier)	20	0,05
Forêt tropicale	20	0,03
Zone suburbaine	9	0,025
Zone suburbaine dense	12	0,02
Zone urbaine	20	0,02
Zone urbaine dense	25	0,02
Zone urbaine (immeubles de grande hauteur)	35	0,02
Zone industrielle	20	0,05

Il ne faut pas considérer d'affaiblissements supplémentaires dus à l'occultation par des groupes d'obstacles (ou par la couverture du terrain) pour des catégories n'apparaissant pas dans le Tableau 4.

FIGURE 3

Méthode pour appliquer la correction de gain de surélévation,  $A_{ht}$  ou  $A_{hr}$ 

## 4.5.4 Méthode d'application

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

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

*Etape 1:* Si l'on connaît la nature du groupe d'obstacles ou si l'on peut faire une hypothèse à ce sujet sans risque d'erreur, on appliquera la méthode principale pour calculer l'affaiblissement de transmission de référence jusqu'à la hauteur nominale  $h_a$ , pour le type de groupe d'obstacles considéré (choisi dans le Tableau 4). La longueur de trajet à prendre en compte est  $d - d_k$  (km). Toutefois, si  $d \gg d_k$ , cette petite correction pour tenir compte de  $d_k$  peut être négligée sans risque d'erreur.

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

*Etape 3:* Après avoir appliqué complètement la méthode principale, on peut ajouter la correction pour le gain de surélévation d'après l'équation (57), comme indiqué dans l'équation (64).

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

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

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

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

#### 4.6 Prévision globale

Il convient d'appliquer la procédure suivante aux résultats des calculs précédents pour tous les trajets.

On calcule un facteur d'interpolation,  $F_j$ , pour tenir compte de la distance angulaire du trajet:

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

où:

- $\xi$ : paramètre réglable défini actuellement comme étant égal à 0,8
- $(S_{im} - S_{tr})$ : paramètres de pente définis dans les formules (14) et (15)
- $\Theta$ : 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 3)
- $d_{sw}$ : paramètre constant déterminant la gamme des distances pour la technique associant les différents mécanismes de propagation blending (valeur fixée à 20)
- $\kappa$ : 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.

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 aux valeurs de  $p$  et de  $\beta_0$ .

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

$$L_{bam} = L_{bda} + (L_{mint0p} - L_{bda}) F_j \quad \text{dB} \quad (63)$$

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

$$L_b = -5 \log(10^{-0,2L_s} + 10^{-0,2L_{bam}}) + A_{ht} + A_{hr} \quad \text{dB} \quad (64)$$

où:

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

#### 4.7 Calcul de l'affaiblissement de transmission

La méthode décrite aux § 4.1 à 4.6 donne l'affaiblissement de transmission de référence entre les deux stations. Pour calculer le niveau de signal reçu dans une station par suite du brouillage imputable à l'autre station, il faut connaître l'affaiblissement de transmission, qui tient compte des gains d'antenne des deux stations dans la direction du trajet radioélectrique (en l'occurrence, le trajet de brouillage) qui les relie.

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

On calcule l'angle  $\delta$  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:

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

On calcule l'angle azimutal de la station  $r$  à la station  $t$ ,  $\alpha_{rt}$ , 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 ( $\varepsilon_t$ ,  $\alpha_t$ ), et que la direction du faisceau principal de la station  $r$  est désignée par les angles ( $\varepsilon_r$ ,  $\alpha_r$ ). Pour obtenir les angles d'élévation du trajet radioélectrique (en l'occurrence, le trajet de brouillage) relatifs aux stations  $t$  et  $r$ , notés respectivement  $\varepsilon_{pt}$  et  $\varepsilon_{pr}$ , 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

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

A noter que les angles par rapport à l'horizon radioélectrique,  $\theta_t$  et  $\theta_r$  (mrad), apparaissent pour la première fois dans le Tableau 3 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  $r$ ,  $\chi_t$  et  $\chi_r$ , respectivement, et la direction du trajet de brouillage au niveau des stations  $t$  et  $r$ , il est recommandé d'utiliser l'expression suivante:

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

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,  $\theta_t$  et  $\theta_r$ . L'utilisation de ces derniers ne devrait introduire qu'une erreur négligeable, à moins qu'ils ne coïncident également avec les directions d'axe de visée de leur station respective.

## 5 Prévision des brouillages dus à la diffusion par les hydrométéores

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

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

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

### 5.1 Introduction

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

$$P_r = P_t \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \iiint_{all\ space} \frac{G_t G_r \eta A}{r_t^2 r_r^2} dV \quad \text{W} \quad (73)$$

où:

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

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

$$L = 178 - 10 \log N - 20 \log f - 10 \log Z_R - 10 \log C - 10 \log S + A_g - M \quad \text{dB} \quad (74)$$

où:

- $N$  : terme de diffusion de Rayleigh dépendant de l'indice de réfraction

$$N = \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 \quad (74a)$$

- $m$  : indice de réfraction complexe dépendant de la fréquence et des conditions atmosphériques
- $f$  : fréquence (GHz)
- $Z_R$  : réflectivité du radar au sol, qui peut être exprimée sous forme du taux de précipitation,  $R$  (mm/h):

$$Z_R = 400R^{1,4} \quad (75)$$

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

$$10 \log S = \begin{cases} R^{0,4} \cdot 10^{-3} \left[ 4(f-10)^{1,6} \left( \frac{1+\cos\varphi_S}{2} \right) + 5(f-10)^{1,7} \left( \frac{1-\cos\varphi_S}{2} \right) \right] & \text{pour } f > 10 \text{ GHz} \\ 0 & \text{pour } f \leq 10 \text{ GHz} \end{cases} \quad (76)$$

où:

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

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

$$d_c = 3,3R^{-0,08} \quad \text{km} \quad (77)$$

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

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

$$C = \int_0^{h_{max}} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{d_c}{2}} \frac{G_1 G_2}{r_1^2 r_2^2} A \zeta \cdot r \, dr d\varphi dh \quad (78)$$

où:

$G_1, G_2$  : gains linéaires, respectivement de la Station 1 et de la Station 2

$r_1, r_2$  : distances (km), entre l'élément d'intégration  $\delta V$  et, respectivement, la Station 1 et la Station 2

$A$  : affaiblissement dû à la pluie, à l'intérieur et à l'extérieur de la cellule de pluie, exprimé en termes linéaires

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

$$\zeta = \begin{cases} 1 & \text{pour } h \leq h_R \\ 10^{-0,65(h-h_R)} & \text{pour } h > h_R \end{cases} \quad (79)$$

$h_R$  : hauteur de pluie, (km)

$r, \varphi, h$  : variables d'intégration dans la cellule de pluie.

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

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

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

## 5.2 Paramètres d'entrée

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

TABLEAU 5

**Liste des paramètres d'entrée**

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

Paramètre	Unité	Description
$d$	km	Distance entre les stations
$f$	GHz	Fréquence
$h_{1\_loc}, h_{2\_loc}$	km	Hauteur de la Station 1 et hauteur de la Station 2 au-dessus du niveau moyen de la mer (valeur locale)
$G_{max-1}, G_{max-2}$	dB	Gain maximal pour chaque antenne
$h_R(p_h)$	km	Distribution cumulative de la hauteur de pluie dépassée exprimée sous forme d'un pourcentage de temps $p_h$ (voir la Note 1)
$M$	dB	Désadaptation de polarisation entre les systèmes
$P$	hPa	Pression à la surface (valeur par défaut 1013,25 hPa)
$R(p_R)$	mm/h	Distribution cumulative du taux de précipitation dépassé exprimée sous forme d'un pourcentage de temps $p_R$
$T$	°C	Température à la surface (valeur par défaut 15° C)
$\alpha_{1\_loc}, \alpha_{2\_loc}$	rad	Azimut géographique de la Station 1 vers la Station 2 et azimuth géographique de la Station 2 vers la Station 1, dans le sens des aiguilles d'une montre
$\varepsilon_{H1\_loc}, \varepsilon_{H2\_loc}$	rad	Angles de site de l'horizon local pour la Station 1 et pour la Station 2
$\rho$	g/m <sup>3</sup>	Densité de vapeur d'eau à la surface (valeur par défaut 8 g/m <sup>3</sup> )
$\tau$	degrés	Angle de polarisation de la liaison (0° pour la polarisation horizontale, 90° pour la polarisation verticale)

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

### 5.3 La procédure, étape par étape

#### *Etape 1: Détermination des paramètres météorologiques*

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

TABLEAU 6

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

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

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

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

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

*Etape 2: Conversion des paramètres géométriques pour une représentation plane*

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

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{1-loc}, \alpha_1 = \alpha_{1-loc} \text{ et } \varepsilon_{H1} = \varepsilon_{H1-loc} \quad \text{rad} \quad (80)$$

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

$$r_{eff} = k_{50} R_E \quad \text{km} \quad (81)$$

où:

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

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

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

$$\delta = \frac{d}{r_{eff}} \quad \text{rad} \quad (82)$$

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

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

$$\varepsilon_2 = \arcsin(\cos \varepsilon_{2\_loc} \cos \alpha_{2\_loc} \sin \delta + \sin \varepsilon_{2\_loc} \cos \delta) \quad (83)$$

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

$$\varepsilon_{H2} = \arcsin(\cos \varepsilon_{H2\_loc} \cos \alpha_{2\_loc} \sin \delta + \sin \varepsilon_{H2\_loc} \cos \delta) \quad (84)$$

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

$$\alpha_2 = \arctan\left(\frac{\cos \varepsilon_{2\_loc} \sin \alpha_{2\_loc}}{\cos \varepsilon_{2\_loc} \cos \alpha_{2\_loc} \cos \delta - \sin \varepsilon_{2\_loc} \sin \delta}\right) \quad (85)$$

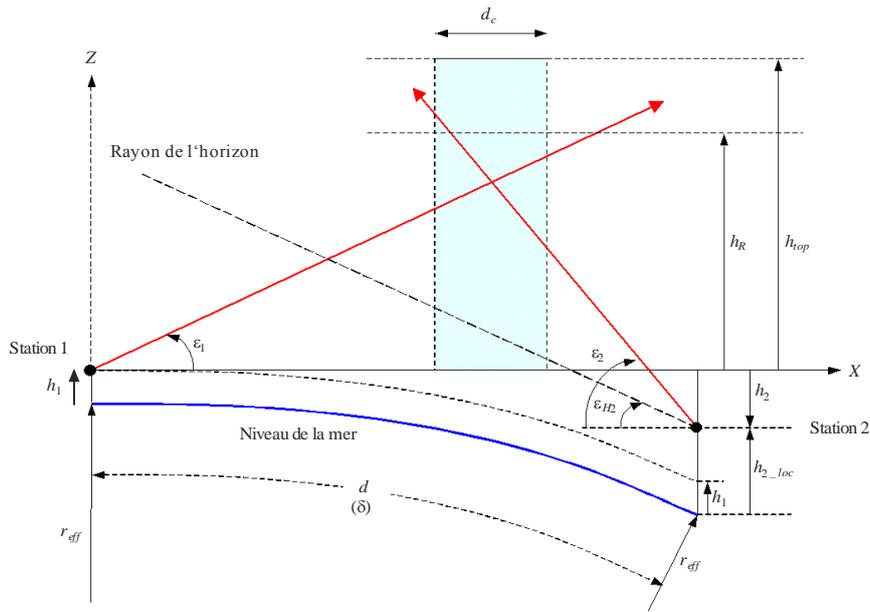
et la hauteur de la Station 2 au-dessus du plan de référence est donnée par:

$$h_2 = h_{2\_loc} - h_1 - d \frac{\delta}{2} \quad \text{km} \quad (86)$$

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

$$\alpha_S = \pi - (\alpha_1 - \alpha_2) \quad \text{rad} \quad (87)$$

FIGURE 4  
Géométrie des stations pour une Terre courbe



P.0452-04

### Etape 3: Détermination de la géométrie des liaisons

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

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

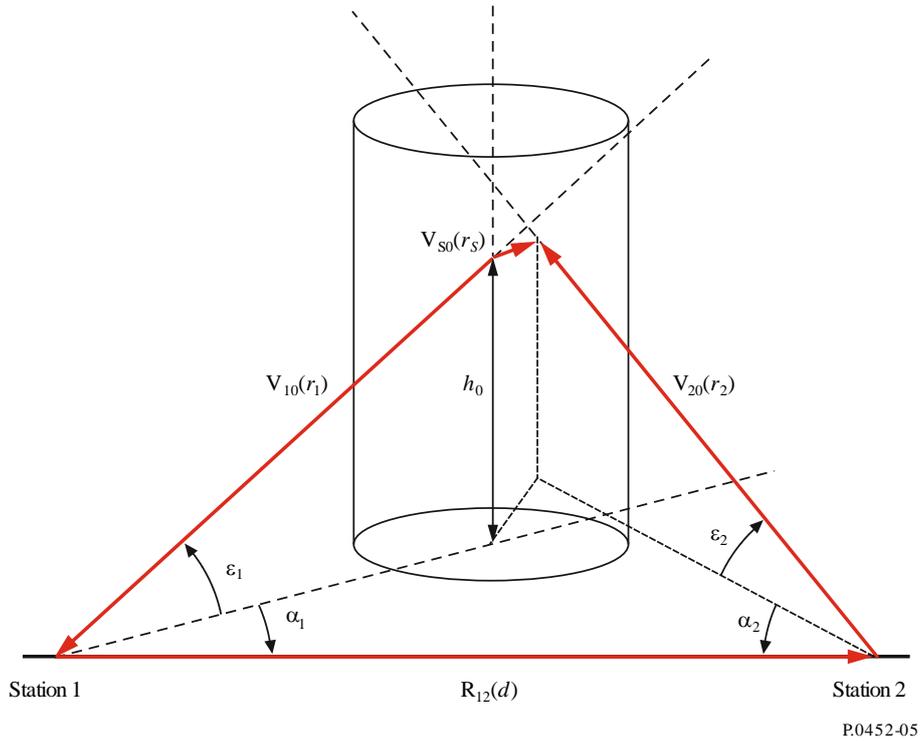
Un vecteur unité de longueur sera, en règle générale, représenté par le symbole  $\mathbf{V}$ , alors qu'un vecteur général (par exemple, de grandeur) sera représenté par un autre symbole approprié, par exemple  $\mathbf{R}$ .

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

FIGURE 5

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

A noter que les faisceaux des antennes ne coïncident pas dans cet exemple et que «l'angle de divergence» n'est pas égal à zéro. Voir les équations (89) et (90)



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

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

$$\mathbf{R}_{12} = \begin{bmatrix} d \\ 0 \\ h_2 \end{bmatrix} \quad \text{km} \quad (88)$$

Les vecteurs  $\mathbf{R}_{12}$ ,  $r_2\mathbf{V}_{20}$ ,  $r_s\mathbf{V}_{s0}$  et  $r_1\mathbf{V}_{10}$  forment un polygone à trois dimensions fermé, le vecteur  $\mathbf{V}_{s0}$  étant perpendiculaire aux vecteurs  $\mathbf{V}_{10}$  et  $\mathbf{V}_{20}$ . Dans l'exemple illustré sur la Fig. 5, le vecteur  $\mathbf{V}_{s0}$  est dans le plan de la page.

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

$$\mathbf{V}_{10} = \begin{bmatrix} \cos \epsilon_1 \cos \alpha_1 \\ -\cos \epsilon_1 \sin \alpha_1 \\ \sin \epsilon_1 \end{bmatrix} \quad (89)$$

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

$$\mathbf{V}_{20} = \begin{bmatrix} \sin \varepsilon_{2\_loc} \sin \delta - \cos \varepsilon_{2\_loc} \cos \alpha_{2\_loc} \cos \delta \\ \cos \varepsilon_{2\_loc} \sin \alpha_{2\_loc} \\ \sin \varepsilon_{2\_loc} \cos \delta + \cos \varepsilon_{2\_loc} \cos \alpha_{2\_loc} \sin \delta \end{bmatrix} \quad (90)$$

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

$$\mathbf{V}_1 \cdot \mathbf{V}_2 = x_1 x_2 + y_1 y_2 + z_1 z_2$$

où:

$$\mathbf{V}_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix}$$

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

$$\varphi_S = \arccos(-\mathbf{V}_{20} \cdot \mathbf{V}_{10}) \quad (91)$$

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

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

$$\mathbf{R}_{12} + r_2 \mathbf{V}_{20} - r_S \mathbf{V}_{S0} - r_1 \mathbf{V}_{10} = 0 \quad (92)$$

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

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

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

$$\mathbf{V}_{S0} = \frac{\mathbf{V}_{20} \times \mathbf{V}_{10}}{\sin \varphi_S} \quad (93)$$

L'équation (92) peut être résolue en utilisant le déterminant des trois vecteurs qui s'écrit et est évalué comme suit:

$$\det[\mathbf{V}_1 \quad \mathbf{V}_2 \quad \mathbf{V}_3] = \det \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ z_1 & z_2 & z_3 \end{bmatrix} = x_1(y_2z_3 - y_3z_2) + x_2(y_3z_1 - y_1z_3) + x_3(y_1z_2 - y_2z_1)$$

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

$$r_s = \frac{\det[\mathbf{V}_{10} \quad \mathbf{V}_{20} \quad \mathbf{R}_{12}]}{\det[\mathbf{V}_{10} \quad \mathbf{V}_{20} \quad \mathbf{V}_{s0}]} \quad (94)$$

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

$$r_1 = \frac{\det[\mathbf{R}_{12} \quad \mathbf{V}_{20} \quad \mathbf{V}_{s0}]}{\det[\mathbf{V}_{10} \quad \mathbf{V}_{20} \quad \mathbf{V}_{s0}]} \quad (95)$$

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

$$r_2 = \frac{-\det[\mathbf{V}_{10} \quad \mathbf{R}_{12} \quad \mathbf{V}_{s0}]}{\det[\mathbf{V}_{10} \quad \mathbf{V}_{20} \quad \mathbf{V}_{s0}]} \quad (96)$$

On calcule «l'angle de divergence» hors axe  $\psi_1$  au niveau de la Station 1 au point de rapprochement maximal de l'axe du faisceau principal de la Station 2:

$$\Psi_1 = \arctg\left(\frac{|r_s|}{r_1}\right) \quad (97)$$

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

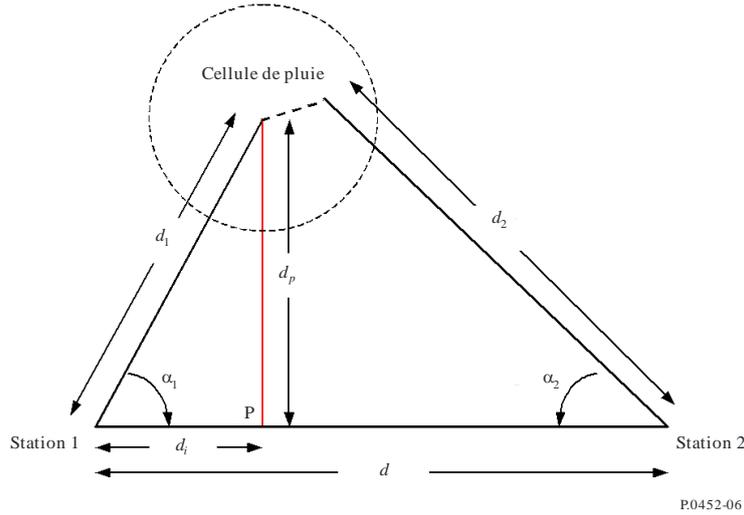
$$\Psi_2 = \arctg\left(\frac{|r_s|}{r_2}\right) \quad (98)$$

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

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

FIGURE 6

## Vue du plan de la géométrie pour la diffusion latérale



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

$$d_1 = r_1 \cos \varepsilon_1 \quad \text{km} \quad (99)$$

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

$$d_2 = r_2 \cos \varepsilon_2 \quad \text{km} \quad (100)$$

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

$$h_0 = |r_1| \sin \varepsilon_1 \quad \text{km} \quad (101)$$

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

$$h_{1,2,0} = |r_{1,2}| \sin \varepsilon_{1,2} - h_{c1,2} \quad \text{km} \quad (102)$$

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

$$d_p = d_1 \sin \alpha_1 \quad (103)$$

et l'espacement angulaire est alors :

$$\delta_p = \frac{d_p}{r_{eff}} \quad \text{km} \quad (104)$$

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

$$h_{c1,2} = (r_{eff} + h_{1,2}) \left( \frac{1}{\cos(\delta_p)} - 1 \right) \quad \text{km} \quad (105)$$

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

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

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

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

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

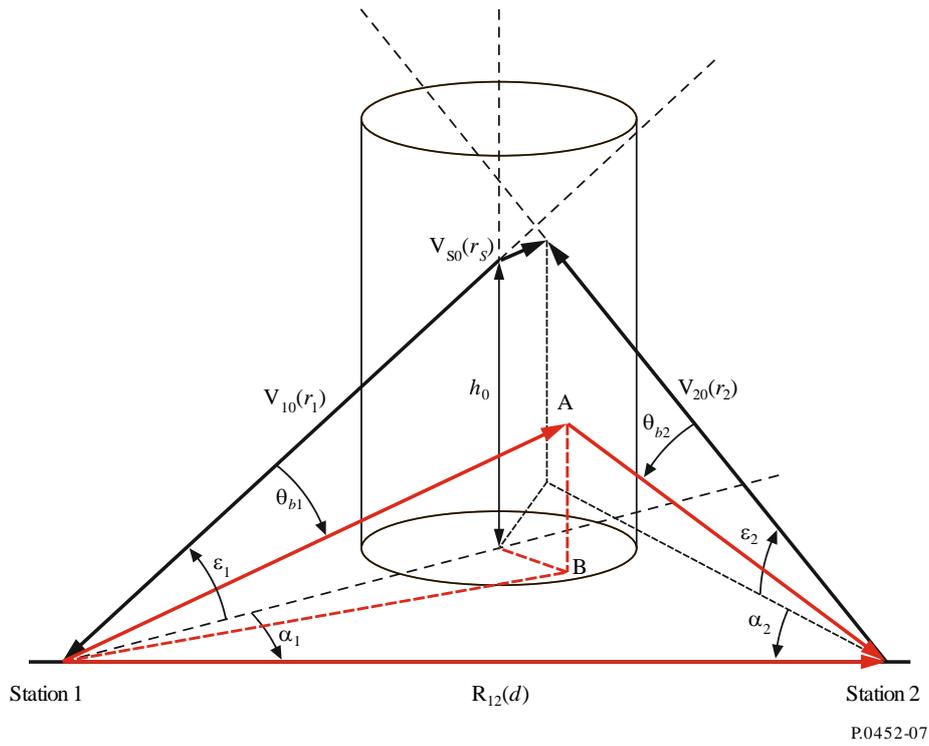
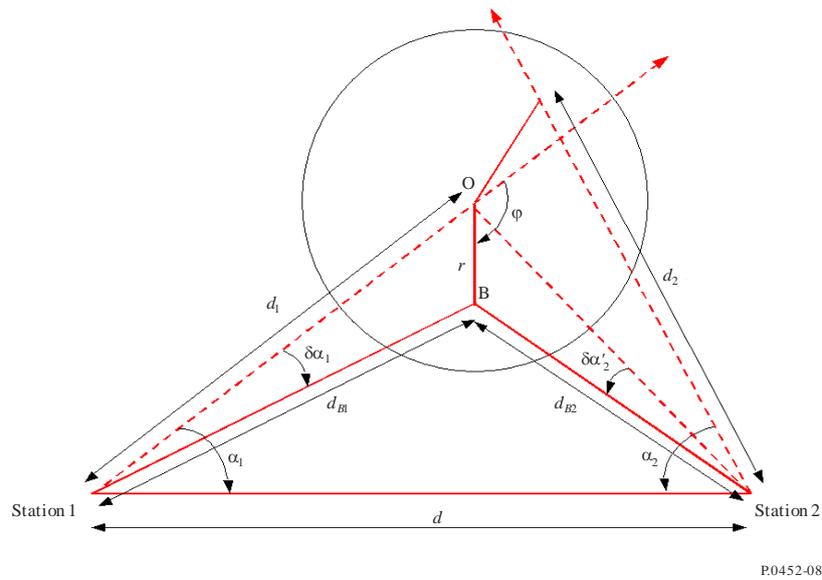


FIGURE 8  
Vue du plan de la géométrie pour déterminer les gains d'antenne



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

$$d_{B1} = \sqrt{r^2 + d_1^2 + 2rd_1 \cos \varphi} \quad \text{km} \quad (106)$$

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

$$\delta\alpha_1 = \arcsin\left(\frac{r \sin \varphi}{d_{B1}}\right) \quad (107)$$

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

$$\varepsilon_{A1} = \arctan\left(\frac{h}{d_{B1}}\right) \quad (108)$$

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

$$\mathbf{V}_{A1} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_{A1} \cos(\alpha_1 - \delta\alpha_1) \\ -\cos \varepsilon_{A1} \sin(\alpha_1 - \delta\alpha_1) \\ \sin \varepsilon_{A1} \end{bmatrix} \quad (109)$$

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

$$\theta_{b1} = \arccos(\mathbf{V}_{A1} \cdot \mathbf{V}_{10}) \quad (110)$$

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

$$r_{A1} = \frac{d_{B1}}{\cos \varepsilon_{A1}} \quad \text{km} \quad (111)$$

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

$$\mathbf{R}_{A2} = \mathbf{R}_{12} - r_{A1} \mathbf{V}_{A1} \quad \text{km} \quad (112)$$

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

$$r_{A2} = |\mathbf{R}_{A2}| \quad \text{km} \quad (113)$$

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

$$\mathbf{V}_{A2} = \frac{\mathbf{R}_{A2}}{r_{A2}} \quad (114)$$

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

$$\theta_{b2} = \arccos(-\mathbf{V}_{A2} \cdot \mathbf{V}_{20}) \quad (115)$$

La méthode ci-dessus permettant de déterminer les gains d'antenne ne convient que pour des antennes circulaires. Si l'antenne de la Station 1 est une antenne sectorielle ou une antenne équidirective, comme dans le cas des systèmes de radiodiffusion point-multipoint, on utilise une méthode légèrement différente pour déterminer le gain de l'antenne qui variera uniquement dans la direction verticale (à l'intérieur de la zone couverte par la cellule de pluie). Dans ce cas, l'angle de visée hors axe dans la direction verticale est déterminé de façon plus simple à partir de:

$$\theta_{b1} = |\varepsilon_{A1} - \varepsilon_1| \quad (116)$$

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

$$\theta_{b2} = |\varepsilon_{A2} - \varepsilon_2| \quad (117)$$

où:

$$\varepsilon_{A2} = \arctg\left(\frac{h}{d_{B2}}\right) \quad (118)$$

et

$$d_{B2} = \sqrt{d^2 + d_{B1}^2 - 2d \cdot d_{B1} \cos(\alpha_1 - \delta\alpha_1)} \quad \text{km} \quad (119)$$

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

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

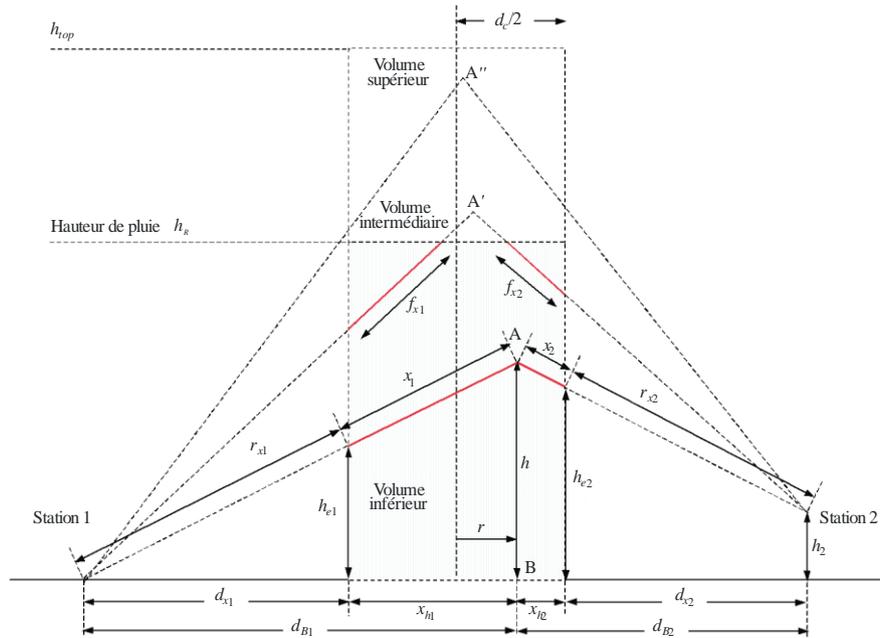
#### *Etape 5: Détermination des longueurs des trajets dans la cellule de pluie*

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

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

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

FIGURE 9  
Volumes d'intégration dans la cellule de pluie



P.0452-09

**Volume inférieur**

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

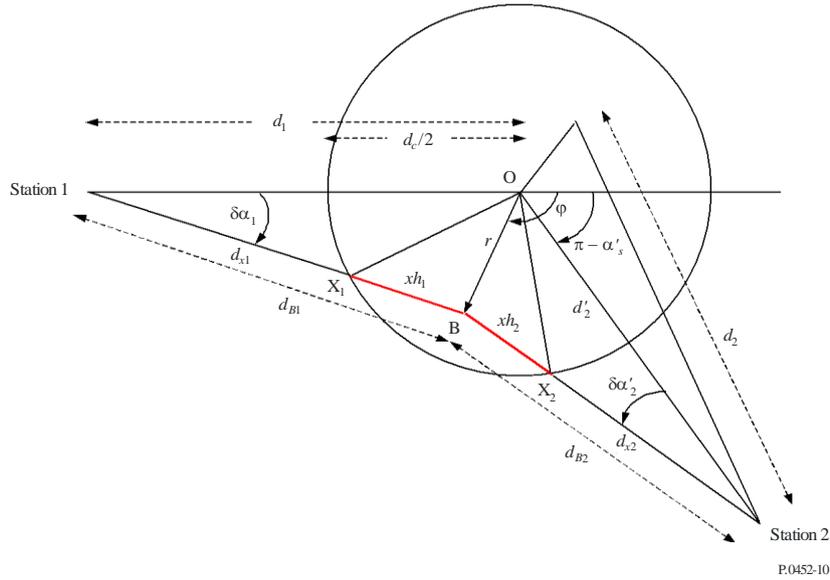
$$A_{1,2} = \gamma_{R1,2} x_{1,2} \quad \text{dB} \quad (120)$$

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

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

FIGURE 10

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



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

$$d_{x1} = d_1 \cos \delta \alpha_1 - \sqrt{d_1^2 \cos^2 \delta \alpha_1 - d_1^2 + \left(\frac{d_c}{2}\right)^2} \quad \text{km} \quad (121)$$

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

$$r_{x1} = \frac{d_{x1}}{\cos \epsilon_{A1}} \quad \text{km} \quad (122)$$

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

$$\delta \alpha_2 = \arctan \left( \frac{-r \sin(\varphi + \alpha'_s)}{d'_2 + r \cos(\varphi + \alpha'_s)} \right) \quad (123)$$

où  $\alpha'_s$  est donné par

$$\alpha'_s = \arcsin \left( \frac{d}{d'_2} \sin \alpha_1 \right) \quad (124)$$

et

$$d'_2 = \sqrt{d^2 + d_1^2 - 2d \cdot d_1 \cos \alpha_1} \quad \text{km} \quad (125)$$

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

$$d_{x2} = d'_2 \cos \delta\alpha'_2 - \sqrt{\left(\frac{d_c}{2}\right)^2 - d'^2_2 \sin^2 \delta\alpha'_2} \quad \text{km} \quad (126)$$

On calcule la distance entre la Station 2 et le bord de la cellule:

$$r_{x2} = \frac{d_{x2}}{\cos \varepsilon_{A2}} \quad \text{km} \quad (127)$$

Maintenant, il faut examiner deux cas:

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

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

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

$$x_1 = \begin{cases} r_{A1} - r_{x1} & \text{si } d_1 > \frac{d_c}{2} \\ r_{A1} & \text{si } d_1 \leq \frac{d_c}{2} \end{cases} \quad \text{km} \quad (128)$$

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

$$x_2 = \begin{cases} r_{A2} - r_{x2} & \text{si } d_2 > \frac{d_c}{2} \\ r_{A2} & \text{si } d_2 \leq \frac{d_c}{2} \end{cases} \quad \text{km} \quad (129)$$

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

$$A_b = \exp[-k(\gamma_{R1}x_1 + \gamma_{R2}x_2)] \quad \text{si } h \leq h_R \quad (130)$$

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

### **Volume intermédiaire et volume supérieur**

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

$$\varepsilon_{A1} < \varepsilon_{C1} = \arctan\left(\frac{h_R}{d_{x1}}\right)$$

et:

$$\varepsilon_{A2} < \varepsilon_{C2} = \arctan\left(\frac{h_R - h_2}{d_{x2}}\right)$$

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

Sur la base de la Fig. 9, on peut déterminer les hauteurs auxquelles les rayons depuis l'élément d'intégration au point A traversent les bords de la cellule de pluie, à partir des rapports des distances horizontales entre chacune des stations et, d'une part, le bord de la cellule de pluie et, d'autre part, le point B:

$$\begin{aligned} h_{e1} &= h \cdot \frac{d_{x1}}{d_{B1}} && \text{km} && (131) \\ h_{e2} &= (h - h_2) \cdot \frac{d_{x2}}{d_{B2}} + h_2 \end{aligned}$$

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

$$f_{x1,2} = \begin{cases} x_{1,2} \left( \frac{h_R - h_{e1,2}}{h - h_{e1,2}} \right) & \text{si } h > h_R > h_{e1,2} \text{ et } \varepsilon_{A1,2} < \varepsilon_{C1,2} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad \text{km} \quad (132)$$

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

$$A = \exp\left[-k\{6,5(h - h_R) + \gamma_{R1}f_{x1} + \gamma_{R2}f_{x2}\}\right] \quad \text{pour } h \geq h_R \quad (133)$$

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

#### *Etape 6: Affaiblissement en dehors de la cellule de pluie*

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

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

$$r_m = 600R^{-0,5}10^{-(R+1)^{0,19}} \quad \text{km} \quad (134)$$

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

$$A_{ext1,2} = \begin{cases} \frac{\gamma_{R1,2} r_m}{\cos \varepsilon_{A1,2}} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{d_{x1,2}}{r_m}\right) \right] & \text{si } d_{1,2} > \frac{d_c}{2} \text{ et } f_{x1,2} \neq 0 \\ 0 & \text{si } d_{1,2} \leq \frac{d_c}{2} \text{ ou } f_{x1,2} = 0 \end{cases} \quad \text{dB} \quad (135)$$

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

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

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

$$C_b = \int_{h_{min}}^{h_R} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{d_c}{2}} \frac{G_1 G_2}{r_{A1}^2 r_{A2}^2} \exp[-k(\gamma_{R1} x_1 + \gamma_{R2} x_2 + A_{ext1} + A_{ext2})] \cdot r dr d\varphi dh \quad (136)$$

$$C_a = \int_{h_R}^{h_{top}} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{d_c}{2}} \frac{G_1 G_2}{r_{A1}^2 r_{A2}^2} \exp[-k(6,5(h - h_R) + \gamma_{R1} f_{x1} + \gamma_{R2} f_{x2} + A_{ext1} + A_{ext2})] \cdot r dr d\varphi dh \quad (137)$$

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

$$r_{A1,2}(r, h, \varphi) = \sqrt{(r \cos \varphi - d_{1,2})^2 + r^2 \sin^2 \varphi + (h - h_{1,2})^2} \quad \text{km} \quad (137a)$$

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

$$h_{min} = \max(d_{x1} \text{tg } \varepsilon_{H1}, d_{x2} \text{tg } \varepsilon_{H2}) \quad \text{km} \quad (138)$$

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

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

Les intensités en champ proche des antennes dépendent dans une large mesure de détails propres au matériel, et il est possible que l'on n'ait pas accès facilement à ces informations pour l'analyse de base des brouillages. Par conséquent, 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 semble se vérifier en général.

Procédure à utiliser pour appliquer une puissance de diffusion en champ proche approchée:

- 1) Déterminer si la région du champ proche de l'émetteur ou du récepteur de rayon  $d_{nf} = \frac{2cG}{\pi^2 f}$  est contenue à l'intérieur du rayon de la cellule de pluie, à savoir si  $d_{1,2} + d_{nf} < d_c/2$ . Si elle n'est contenue que partiellement, à savoir si  $d_{1,2} - d_{nf} < d_c/2$ , alors on suppose en tant qu'approximation qu'elle est contenue entièrement.
- 2) Appliquer la condition suivante dans la procédure d'intégration pour les formules (136) et (137):  
si  $r_{A1,2} < r_{nf}$  alors  $r_{A1,2} = r_{nf}$ .

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

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

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

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

```

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

```

*La méthode des trapèzes élargie*

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

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

où:

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

Le nombre d'intervalles peut être doublé par récurrence:

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

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

*Extrapolation polynomiale*

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

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

où:

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

et

$P$  : polynôme inconnu.

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

Habituellement on utilise la méthode de Neville pour calculer la valeur du polynôme en  $h = 0$ . Cette méthode est efficace et permet d'obtenir une estimation de l'erreur qui peut être utilisée pour terminer l'intégration de Romberg. Cette méthode est une approximation par interpolations linéaires successives de l'interpolation polynomiale de Lagrange de degré supérieur. La méthode de Lagrange peut être décrite comme suit. Pour  $M + 1$  points  $(x_i, y_i)$ , un polynôme de degré  $m$  peut être défini comme étant une combinaison linéaire de fonctions de base:

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

c'est-à-dire:

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

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

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

Le résultat final peut être représenté comme suit:

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

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

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

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

Trois intégrations numériques imbriquées sont nécessaires pour effectuer l'intégration volumique tridimensionnelle sur la cellule de pluie, en coordonnées cylindriques, l'intégration extérieure se faisant sur le paramètre de hauteur  $h$ , par exemple. L'intégration se fait aussi sur le paramètre azimut  $\varphi$  pour une valeur particulière de  $h$ , et sur le paramètre rayon  $r$  pour des valeurs particulières de  $(h, \varphi)$ .

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

#### *Etape 8: Détermination d'autres facteurs d'affaiblissement*

On calcule l'écart par rapport à la diffusion de Rayleigh en utilisant l'équation (76) avec l'angle de diffusion  $\varphi_s$  donné par l'équation (91).

On calcule l'affaiblissement le long des trajets dû à l'absorption par les gaz atmosphériques (Annexe 2 de la Recommandation UIT-R P.676) pour les affaiblissements linéiques  $\gamma_o$  et  $\gamma_w$  et les hauteurs équivalentes  $h_o$  et  $h_w$ , respectivement pour un air sec et pour la vapeur d'eau. On calcule les affaiblissements à l'aide des expressions ci-après pour l'affaiblissement sur le trajet entre deux altitudes au-dessus du niveau de la mer, la valeur supérieure étant déterminée par la hauteur du point de quasi-intersection entre les deux axes des faisceaux principaux des antennes. Cette méthode est une approximation étant donné que l'affaiblissement effectif par les gaz variera pour chaque élément de diffusion dans le volume de diffusion. Toutefois, étant donné que l'affaiblissement par les gaz est en général une composante mineure de l'affaiblissement de transmission total et qu'il varie peu,

comparé aux incertitudes qui pèsent sur d'autres paramètres comme le taux de précipitation, la hauteur de pluie ou la géométrie de la cellule de pluie elle-même, on considère que cette simplification est justifiée. La méthode ci-après permet d'avoir des estimations de l'affaiblissement par les gaz avec une précision acceptable pour l'ensemble de la procédure.

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

$$h_p = h_0 + \sqrt{d_1^2 + r_{eff}^2} - r_{eff} + h_c \quad \text{km} \quad (139)$$

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

$$A_{o\_i} = \frac{\gamma_o h_o - \gamma_o h_o \left[ \exp\left(-\frac{h_{i\_loc}}{h_o}\right) - \exp\left(-\frac{h_p}{h_o}\right) \right]}{\sin \varepsilon_{i\_loc}} \quad \text{dB} \quad (140)$$

$$A_{w\_i} = \frac{\gamma_w h_o - \gamma_w h_o \left[ \exp\left(-\frac{h_{i\_loc}}{h_w}\right) - \exp\left(-\frac{h_p}{h_w}\right) \right]}{\sin \varepsilon_{i\_loc}} \quad \text{dB} \quad (141)$$

où l'indice  $i$  renvoie à chacune des deux stations et  $\varepsilon_{i\_loc}$  représente l'angle d'élévation local de chaque antenne.

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

$$\rho = \rho_g \exp\left(\frac{h_{i\_loc}}{2}\right) \quad \text{g/m}^3 \quad (142)$$

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

$$\varepsilon'_{1,2} = \arccos\left(\frac{h_{1,2} + r_{eff}}{h_p + r_{eff}} \cos \varepsilon_{1,2\_loc}\right) \quad (143)$$

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

Pour l'affaiblissement dû à l'air sec:

$$A_{o\_i} = \gamma_o \sqrt{h_o} \left[ \frac{\sqrt{h_{i\_loc} + r_{eff}} \cdot F \left( \tan \varepsilon_i \sqrt{\frac{h_{i\_loc} + r_{eff}}{h_o}} \right) \exp \left( -\frac{h_{i\_loc}}{h_o} \right)}{\cos \varepsilon_{i\_loc}} - \frac{\sqrt{h_p + r_{eff}} \cdot F \left( \tan \varepsilon'_i \sqrt{\frac{h_p + r_{eff}}{h_o}} \right) \exp \left( -\frac{h_p}{h_o} \right)}{\cos \varepsilon'_i} \right] \text{ dB} \quad (144)$$

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

$$A_{w\_i} = \gamma_w \sqrt{h_w} \left[ \frac{\sqrt{h_{i\_loc} + r_{eff}} \cdot F \left( \tan \varepsilon_i \sqrt{\frac{h_{i\_loc} + r_{eff}}{h_w}} \right) \exp \left( -\frac{h_{i\_loc}}{h_w} \right)}{\cos \varepsilon_{i\_loc}} - \frac{\sqrt{h_p + r_{eff}} \cdot F \left( \tan \varepsilon'_i \sqrt{\frac{h_p + r_{eff}}{h_w}} \right) \exp \left( -\frac{h_p}{h_w} \right)}{\cos \varepsilon'_i} \right] \text{ dB} \quad (145)$$

où la fonction  $F$  est définie par:

$$F(x) = \frac{1}{0,661x + 0,339\sqrt{x^2 + 5,51}} \quad (146)$$

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

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

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

$$L = 178 - 10 \log N - 20 \log f - 10 \log Z_R - 10 \log (C_b + C_a) - 10 \log S + A_g - M \quad \text{dB} \quad (147)$$

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

## 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  $\Delta N$  (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 [REC-P.452-16 Supplement ZIP](#). 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  $0^\circ$  à  $360^\circ$  en longitude et de  $+90^\circ$  à  $-90^\circ$  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 7.

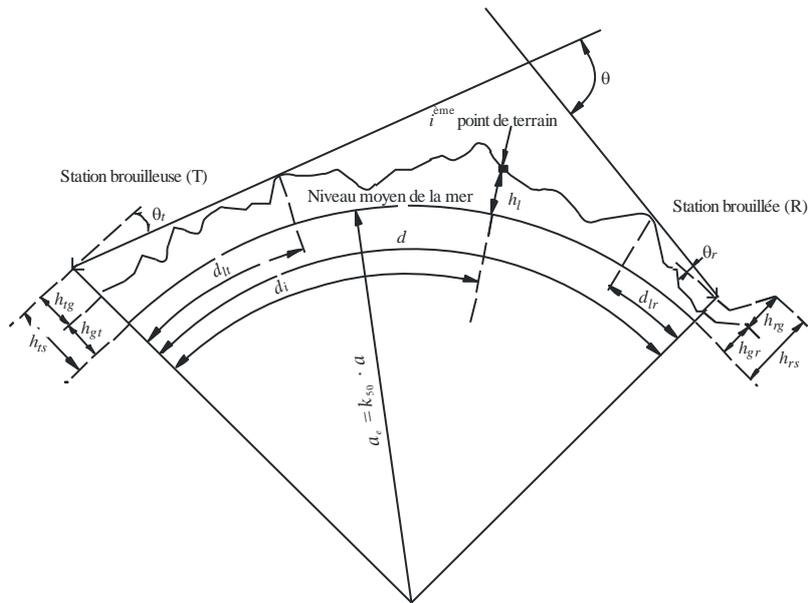
#### 2 Etablissement du profil du trajet

Partant des coordonnées géographiques de la station brouilleuse ( $\phi_r, \psi_r$ ) et de la station brouillée ( $\phi_r, \psi_r$ ) il faut, en utilisant une base de données topographiques ou des cartes de contours à grande échelle appropriées, trouver les hauteurs du terrain (par rapport au niveau moyen de la mer) le long du trajet selon le grand cercle. Dans la mesure du possible, la distance entre les points du profil doit bien rendre compte des caractéristiques particulières du terrain. Un pas compris entre 30 m et 1 km est en principe approprié. En règle générale, il convient d'utiliser des pas plus longs pour des trajets plus longs. Le profil doit comprendre comme points de départ et d'arrivée les hauteurs du sol aux emplacements de la station brouilleuse et de la station brouillée. Les équations suivantes tiennent, si nécessaire, compte de la courbure de la Terre, en utilisant pour celle-ci le rayon  $a_e$  donné par l'équation (6a).

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

Dans la présente Recommandation, les points du profil du trajet correspondant à la station brouilleuse et à la station brouillée sont respectivement appelés point 0 et point  $n$ . Le profil du trajet comprend donc  $n + 1$  points. La Fig. 11 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 11  
Exemple d'un profil de trajet (transhorizon)



Note 1 – La valeur  $\theta$ , ainsi représentée est négative.

P0452-11

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

TABLEAU 7

## Définition des paramètres du profil du trajet

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

### 3 Longueur du trajet

La longueur du trajet peut être obtenue, selon la géométrie du grand cercle, d'après les coordonnées géographiques des stations brouilleuses ( $\varphi_t, \psi_t$ ) et brouillées ( $\varphi_r, \psi_r$ ). En général, la longueur du trajet,  $d$  (km), peut être obtenue à partir des données du profil du trajet par:

$$d = \sum_{i=1}^n (d_i - d_{i-1}) \quad \text{km} \quad (148)$$

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

$$d = n \cdot d_{ii} \quad \text{km} \quad (149)$$

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  $\theta_t$  et  $\theta_r$  (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:

$$\theta_{max} > \theta_{td} \quad \text{mrad} \quad (150)$$

où:

$$\theta_{max} = \max_{i=1}^{n-1} (\theta_i) \quad \text{mrad} \quad (151)$$

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

$$\theta_i = 1000 \arctan \left( \frac{h_i - h_{ts}}{10^3 d_i} - \frac{d_i}{2a_e} \right) \quad \text{mrad} \quad (152)$$

où:

- $h_i$ : hauteur a-dnm (m) du  $i^{\text{ème}}$  point du terrain
- $h_{ts}$ : hauteur a-dnm (m) de l'antenne de la station brouilleuse
- $d_i$ : distance de la station brouilleuse au  $i^{\text{ème}}$  point du terrain (km)

$$\theta_{td} = 1000 \arctan \left( \frac{h_{rs} - h_{ts}}{10^3 d} - \frac{d}{2a_e} \right) \quad \text{mrad} \quad (153)$$

où:

- $h_{rs}$ : hauteur a-dnm (m) de l'antenne de la station brouillée
- $d$ : longueur totale du trajet sur le grand cercle (km)
- $a_e$ : rayon médian équivalent de la Terre, approprié pour le trajet (équation (6a)).

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

### 5.1 Trajets transhorizon

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

#### 5.1.1 Angle d'élévation de l'horizon de l'antenne de la station brouilleuse, $\theta_t$

L'angle d'élévation de l'horizon de l'antenne brouilleuse est l'angle d'élévation maximal calculé par la formule (151) appliquée à  $n - 1$  hauteurs de profil de terrain.

$$\theta_t = \theta_{max} \quad \text{mrad} \quad (154)$$

$\theta_{max}$  étant déterminé comme dans l'équation (151).

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

La distance de l'horizon de l'antenne brouilleuse est la distance minimale depuis l'émetteur correspondant à l'angle d'élévation maximal de l'horizon de l'antenne calculé à l'aide de la formule (151).

$$d_{li} = d_i \quad \text{km} \quad \text{pour max } (\theta_i) \quad (155)$$

### 5.1.3 Angle d'élévation de l'horizon de l'antenne de la station brouillée, $\theta_r$

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

$$\theta_r = \max_{j=1}^{n-1} (\theta_j) \quad \text{mrad} \quad (156)$$

$$\theta_j = 1000 \arctan \left( \frac{h_j - h_{rs}}{10^3(d - d_j)} - \frac{(d - d_j)}{2a_e} \right) \quad \text{mrad} \quad (157)$$

### 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 (151).

$$d_{lr} = d - d_j \quad \text{km} \quad \text{pour max } (\theta_j) \quad (158)$$

### 5.1.5 Distance angulaire, $\theta$ (mrad)

$$\theta = \frac{10^3 d}{a_e} + \theta_t + \theta_r \quad \text{mrad} \quad (159)$$

## 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. Le paragraphe 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 paragraphe 5.1.6.3 décrit le calcul des hauteurs équivalentes des antennes pour le modèle de diffraction,  $h_{std}$  et  $h_{srd}$ , et le paragraphe 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:

$$h_{si} = [(d - d_i) h_{st} + d_i h_{sr}] / d \quad \text{m} \quad (160)$$

où:

$h_{st}$ : hauteur a-dnm (m) d'une surface ajustée par la méthode des moindres carrés à une distance  $d_i$  (km) de la source brouilleuse

$h_{st}$ : hauteur a-dnm (m) de la surface de la Terre régulière au 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.

Evaluer  $h_{st}$  et  $h_{sr}$  comme suit en utilisant les formules (161) à (164):

$$v_1 = \sum_{i=1}^n (d_i - d_{i-1})(h_i + h_{i-1}) \quad (161)$$

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).

$$v_2 = \sum_{i=1}^n (d_i - d_{i-1})[h_i(2d_i + d_{i-1}) + h_{i-1}(d_i + 2d_{i-1})] \quad (162)$$

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

$$h_{st} = \left( \frac{2v_1 d - v_2}{d^2} \right) \quad \text{m} \quad (163)$$

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:

$$h_{sr} = \left( \frac{v_2 - v_1 d}{d^2} \right) \text{m} \quad (164)$$

### 5.1.6.3 Hauteurs équivalentes des antennes 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  $\alpha_{obt}$ ,  $\alpha_{obr}$ , sur la base d'une géométrie pour une Terre plate:

$$h_{obs} = \max_{i=1}^{n-1} \{H_i\} \quad \text{m} \quad (165a)$$

$$\alpha_{obt} = \max_{i=1}^{n-1} \{H_i / d_i\} \quad \text{mrad} \quad (165b)$$

$$\alpha_{obr} = \max_{i=1}^{n-1} \{H_i / (d - d_i)\} \quad \text{mrad} \quad (165c)$$

où:

$$H_i = h_i - [h_{ts}(d - d_i) + h_{rs}d_i] / d \quad \text{m} \quad (165d)$$

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:

$$h_{stp} = h_{st} \quad (\text{m}) \text{ a-dnm} \quad (166a)$$

$$h_{srp} = h_{sr} \quad (\text{m}) \text{ a-dnm} \quad (166b)$$

sinon:

$$h_{stp} = h_{st} - h_{obs}g_t \quad (\text{m}) \text{ a-dnm} \quad (166c)$$

$$h_{srp} = h_{sr} - h_{obs}g_r \quad (\text{m}) \text{ a-dnm} \quad (166d)$$

où:

$$g_t = \alpha_{obt} / (\alpha_{obt} + \alpha_{obr}) \quad (166e)$$

$$g_r = \alpha_{obr} / (\alpha_{obt} + \alpha_{obr}) \quad (166f)$$

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:

$$h_{std} = h_0 \quad (\text{m}) \text{ a-dnm} \quad (167a)$$

sinon:

$$h_{std} = h_{stp} \quad (\text{m}) \text{ a-dnm} \quad (167b)$$

Si  $h_{srp}$  est supérieure à  $h_n$  alors:

$$h_{srd} = h_n \quad (\text{m}) \text{ a-dnm} \quad (167c)$$

sinon:

$$h_{srd} = h_{srp} \quad (\text{m}) \text{ a-dnm} \quad (167d)$$

#### 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:

$$h_{st} = \min(h_{st}, h_0) \quad \text{m} \quad (168a)$$

$$h_{sr} = \min(h_{sr}, h_n) \quad \text{m} \quad (168b)$$

Si l'une de ces deux hauteurs ou les deux ont dû être corrigées à l'aide des équations (168a) ou (168b), il faut également corriger la valeur de la pente  $m$  par la formule:

$$m = \frac{h_{sr} - h_{st}}{d} \quad \text{m/km} \quad (169)$$

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

$$\begin{aligned} h_{te} &= h_{tg} + h_0 - h_{st} & \text{m} \\ h_{re} &= h_{rg} + h_n - h_{sr} & \text{m} \end{aligned} \quad (170)$$

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:

$$h_m = \max_{i=i_{lt}}^{i_{lr}} [h_i - (h_{st} + m \cdot d_i)] \quad \text{m} \quad (171)$$

où:

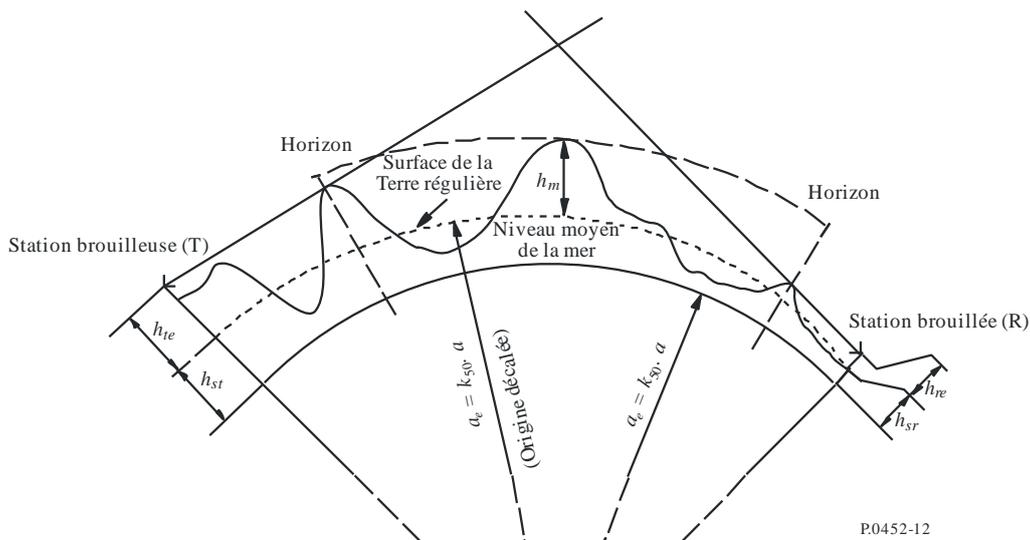
$i_{lt}$ : indice du point du profil à une distance  $d_{lt}$  de l'émetteur

$i_{lr}$ : 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. 12.

FIGURE 12

Exemple de surface de la Terre régulière et de paramètre d'irrégularité du terrain



### 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 (41b). 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:

$$I(x) = \xi(x) - T(x) \quad (172)$$

où:

$$T(x) = \sqrt{[-2 \ln(x)]} \quad (172a)$$

$$\xi(x) = \frac{[(C_2 \cdot T(x) + C_1) \cdot T(x)] + C_0}{[(D_3 \cdot T(x) + D_2) T(x) + D_1] T(x) + 1} \quad (172b)$$

$$C_0 = 2,515516698 \quad (172c)$$

$$C_1 = 0,802853 \quad (172d)$$

$$C_2 = 0,010328 \quad (172e)$$

$$D_1 = 1,432788 \quad (172f)$$

$$D_2 = 0,189269 \quad (172g)$$

$$D_3 = 0,001308 \quad (172h)$$

---