

UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

Recommandation UIT-R P.1812-1
(10/2009)

**Méthode de prévision de la propagation
fondée sur le trajet pour les services de
Terre point à zone dans les bandes des
ondes métriques et décimétriques**

Série P
Propagation des ondes radioélectriques



Avant-propos

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

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

Politique en matière de droits de propriété intellectuelle (IPR)

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

Séries des Recommandations UIT-R

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

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

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

Publication électronique
Genève, 2010

© UIT 2010

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

RECOMMANDATION UIT-R P.1812-1

**Méthode de prévision de la propagation fondée sur le trajet
pour les services de Terre point à zone dans les bandes
des ondes métriques et décimétriques**

(Question UIT-R 203/3)

(2007-2009)

Champ d'application

La présente Recommandation décrit une méthode de prévision de la propagation adaptée aux services de Terre point à zone dans la gamme de fréquences comprise entre 30 MHz et 3 GHz, en vue de l'évaluation détaillée des niveaux du signal qui sont dépassés pendant un pourcentage de temps donné, $p\%$, compris dans la fourchette de valeurs $1\% \leq p \leq 50\%$ et pour un pourcentage d'emplacements donné, p_L , compris dans la fourchette de valeurs $1\% \leq p_L \leq 99\%$. Cette méthode inclut une analyse détaillée sur la base du profil du terrain.

Cette méthode convient aux prévisions effectuées pour des systèmes de radiocommunication utilisant des circuits de terre, dont les trajets vont de 0,25 km à 3 000 km environ, la hauteur au-dessus du niveau du sol des deux terminaux pouvant aller jusqu'à 3 km environ. Elle ne convient pas aux prévisions de la propagation concernant des circuits radioélectriques air-sol ou espace vers Terre.

La présente Recommandation vient compléter la Recommandation UIT-R P.1546.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) qu'il est nécessaire de conseiller les ingénieurs chargés de la planification des services de radiocommunication de Terre dans les bandes des ondes métriques et décimétriques;
- b) qu'il est important de déterminer l'espacement géographique minimal entre stations fonctionnant sur les mêmes canaux ou des canaux adjacents, afin d'éviter des brouillages intolérables occasionnés par une propagation troposphérique à grande distance,

notant

- a) que la Recommandation UIT-R P.528 fournit des indications sur la prévision de l'affaiblissement de transmission sur un trajet point à zone pour le service mobile aéronautique entre 125 MHz et 30 GHz pour des distances allant jusqu'à 1 800 km;
- b) que la Recommandation UIT-R P.452 fournit des indications sur l'évaluation détaillée des brouillages hyperfréquences entre stations situées à la surface de la Terre à des fréquences supérieures à 0,7 GHz environ;
- c) que la Recommandation UIT-R P.617 fournit des indications sur la prévision de l'affaiblissement de transmission sur un trajet point à point pour les faisceaux hertziens transhorizon aux fréquences supérieures à 30 MHz, pour des distances comprises entre 100 et 1 000 km;
- d) que la Recommandation UIT-R P.1411 fournit des indications sur la prévision de la propagation pour les services de radiocommunication extérieurs à courte portée (jusqu'à 1 km);

- e) que la Recommandation UIT-R P.530 fournit des indications sur la prévision de l'affaiblissement sur un trajet point à point pour les systèmes hertziens de Terre à visibilité directe;
- f) que la Recommandation UIT-R P.1546 fournit des indications sur la prévision des champs point à zone dans les bandes des ondes métriques et décimétriques sur la base essentiellement d'analyses statistiques de données expérimentales,

recommande

- 1 d'utiliser la procédure exposée dans l'Annexe 1 pour l'évaluation détaillée des niveaux du signal point à zone en ce qui concerne ces services.

Annexe 1

1 Introduction

Il est recommandé d'utiliser la méthode de prévision de la propagation décrite dans la présente Annexe pour l'évaluation détaillée des niveaux du signal concernant les services de Terre point à zone dans les bandes des ondes métriques et décimétriques. Cette méthode permet de prévoir le niveau du signal (autrement dit, le champ électrique) qui sera dépassé pendant un pourcentage de temps donné, $p\%$, d'une année moyenne, compris dans la fourchette de valeurs $1\% \leq p \leq 50\%$, et pour un pourcentage donné d'emplacements, $p_L\%$, compris dans la fourchette de valeurs $1\% \leq p_L \leq 99\%$. Par conséquent, on peut l'utiliser pour prévoir non seulement la zone de service et la disponibilité pour un certain niveau du signal utile (couverture), mais aussi la mesure dans laquelle cette zone de service et la disponibilité seront réduites en raison de signaux brouilleurs dans le même canal ou dans des canaux adjacents (brouillages).

Dans le cadre de cette méthode, le modèle de prévision de la propagation est symétrique, en ce sens qu'il traite les deux terminaux radioélectriques de la même façon. En effet, dans ce modèle, la question de savoir lequel des deux terminaux est l'émetteur et le récepteur n'a pas d'importance. Toutefois, pour faciliter la description du modèle, on a employé les termes «émetteur» et «récepteur» pour désigner les terminaux situés respectivement au début et à la fin du trajet radioélectrique.

La description de la méthode porte, tout d'abord, sur le calcul de l'affaiblissement de transmission de référence (dB) qui n'est pas dépassé pendant $p\%$ du temps et pour la valeur médiane du nombre d'emplacements. Deux paramètres, à savoir la variabilité en fonction des emplacements et l'affaiblissement dû à la pénétration dans les bâtiments, sont ensuite caractérisés statistiquement par rapport à l'emplacement de chaque récepteur. Enfin, on expose une procédure à suivre pour convertir le champ électrique (dB(μ V/m)) pour une puissance apparente rayonnée de 1 kW.

La présente méthode est essentiellement destinée à s'appliquer à des systèmes utilisant des antennes à faible gain. Toutefois, dans le cas d'antennes à gain élevé, la variation de la précision des calculs ne concerne qu'un élément pris en considération dans l'ensemble de la méthode, à savoir la diffusion troposphérique, et dans ce cas les prévisions varient peu. Par exemple, même avec un gain d'antenne de 40 dBi aux deux extrémités de la liaison, la surestimation des signaux sur un trajet en diffusion troposphérique sera seulement de l'ordre de 1 dB environ.

La présente méthode convient aux prévisions effectuées pour des systèmes de radiocommunication utilisant des circuits de Terre, dont les trajets sont compris entre 0,25 km et 3 000 km environ, la hauteur au-dessus du niveau du sol des deux terminaux pouvant aller jusqu'à 3 km environ. Elle ne convient pas aux prévisions de la propagation effectuées pour des circuits radioélectriques air-sol ou espace vers Terre.

La méthode de prévision de la propagation qui fait l'objet de la présente Annexe est fondée sur le trajet. Les prévisions point à zone reposant sur cette méthode consistent en des séries de nombreuses prévisions point à point (c'est-à-dire point émetteur à multipoint récepteur), uniformément réparties sur des zones de service théoriques. Le nombre de points devrait être suffisamment important pour garantir que les valeurs prévues des affaiblissements de transmission de référence ou des champs ainsi obtenues sont des estimations raisonnables des valeurs médianes, rapportées aux emplacements, des quantités correspondantes pour les zones élémentaires qu'elles représentent.

Par conséquent, il est pris comme hypothèse que les utilisateurs de la présente Recommandation sont à même d'établir des profils de terrain détaillés (c'est-à-dire les hauteurs au-dessus du niveau moyen de la mer) en fonction de la distance mesurée le long de trajets sur le grand cercle (c'est-à-dire des courbes géodésiques) entre les terminaux, pour de nombreux emplacements différents de terminaux (points récepteurs). En ce qui concerne la plupart des applications de la présente méthode à des prévisions de couverture et de brouillage point à zone, cette hypothèse signifie que l'on dispose d'une base de données numérique sur des hauteurs de terrain, référencés en latitude et en longitude par rapport à un référentiel géodésique cohérent, de laquelle il est possible d'extraire des profils de terrain au moyen d'outils automatisés. Si l'on ne dispose pas de ce type de profil de terrain détaillé, il convient d'utiliser la Recommandation UIT-R P.1546 pour effectuer les prévisions.

Compte tenu de ce qui va suivre, les éléments types correspondant à la variabilité en fonction des emplacements et à l'affaiblissement dû à la pénétration dans les bâtiments, pris en compte dans la présente Recommandation, sont caractérisés au moyen des statistiques de distribution log-normales des emplacements des récepteurs. Bien que cette caractérisation statistique de la propagation point à zone aurait pour effet de rendre asymétrique le modèle global (c'est-à-dire non réciproque), les utilisateurs de la présente Recommandation devraient prendre note du fait que la variabilité en fonction des emplacements pourrait, en principe, s'appliquer soit à l'une ou l'autre des extrémités du trajet (autrement dit à l'un des deux terminaux), soit éventuellement aux deux (autrement dit à l'émetteur et au récepteur). Toutefois, la correction de la variabilité en fonction des emplacements a un sens uniquement dans les cas où l'emplacement exact d'un terminal donné n'est pas connu et qu'une représentation statistique tenant compte de l'ensemble des emplacements possibles pour ce terminal est donc requise. Il est peu probable qu'il existe de nombreux cas où cette correction pourrait s'appliquer de façon significative à l'emplacement d'un émetteur. Lorsque les emplacements des deux terminaux sont connus avec exactitude et que cette procédure est utilisée dans une configuration point à point, la présente Recommandation s'applique uniquement avec la valeur $p_L = 50\%$.

D'une certaine façon, ce raisonnement vaut également pour les affaiblissements dus à la pénétration dans les bâtiments, à ceci près qu'il est légèrement plus complexe que dans le cas de la variabilité en fonction des emplacements, étant donné que la correction médiane applicable aux affaiblissements dus à la pénétration dans les bâtiments n'est pas égale à zéro. En effet, du côté de l'émetteur, il convient d'ajouter aussi l'affaiblissement dû à l'entrée dans les bâtiments à l'affaiblissement de transmission de référence, si l'émetteur est situé à l'intérieur d'un bâtiment, mais il faut également être conscient que les valeurs médianes de l'affaiblissement indiquées dans le Tableau 6 peuvent prêter à confusion si l'émetteur ne se trouve pas dans un emplacement «médian».

2 Eléments types de la méthode de prévision de la propagation

Aux fins de la présente méthode de prévision de la propagation, il est tenu compte des éléments types suivants:

- *visibilité directe*
- *diffraction* (y compris en cas de terre régulière, terrain irrégulier et de sous-trajets)
- *diffusion troposphérique*
- *conditions de propagation anormales* (formation de conduits et réflexion ou réfraction sur les couches)
- *variation du gain de surélévation dans un groupe d'obstacles*
- *variabilité en fonction des emplacements*
- *affaiblissements dus à la pénétration dans des bâtiments.*

3 Paramètres d'entrée

3.1 Principales données d'entrée

On trouvera dans le Tableau 1 les principales données d'entrée qui définissent les terminaux de radiocommunication, la fréquence, le pourcentage de temps et les emplacements pour lesquels une prévision est requise.

La latitude et la longitude des deux stations sont des données d'entrée fondamentales, car elles sont nécessaires pour obtenir le profil du trajet. Les paramètres radiométéorologiques doivent être obtenus pour un seul emplacement associé au trajet radioélectrique et il convient de retenir le point milieu du trajet dans le cas d'un trajet couvrant une longue distance. Il y a lieu d'obtenir les paramètres radiométéorologiques de l'emplacement de l'émetteur lors de la prévision de la zone de couverture de ce terminal.

TABLEAU 1
Principales données d'entrée

Paramètre	Unité	Minimale	Maximale	Description
f	GHz	0,03	3,0	Fréquence (GHz)
p	%	1,0	50,0	Pourcentage de l'année moyenne pendant lequel le niveau du signal calculé est dépassé
p_L	%	1	99	Pourcentage des emplacements pour lequel le niveau du signal calculé est dépassé
φ_t, φ_r	degrés	-80	+80	Latitude de l'émetteur, du récepteur
ψ_t, ψ_r	degrés	-180,0	180,0	Longitude de l'émetteur, du récepteur (positive = Est de Greenwich)
h_{tg}, h_{rg}	m	1	3 000	Hauteur du centre de l'antenne au-dessus du niveau du sol

3.2 Profil du terrain

Il est nécessaire de disposer d'un profil de terrain du trajet radioélectrique pour appliquer la méthode de prévision de la propagation. En principe, ce profil se compose de trois matrices ayant le même nombre de valeurs, n , comme suit:

d_i : distance du i -ème point du profil depuis l'émetteur (km) (1a)

h_i : hauteur du i -ème point du profil au-dessus du niveau de la mer (m) (1b)

$g_i = h_i +$ hauteur représentative du groupe d'obstacles pour le i -ème point du profil (m) (1c)

où:

i : 1, 2, 3 ... n = indice du point du profil

n : nombre de points du profil.

Il est à noter que le premier point du profil se situe à l'emplacement de l'émetteur. Par conséquent, d_1 est égal à zéro et h_1 est la hauteur du terrain à l'emplacement de l'émetteur, en mètres, au-dessus du niveau de la mer. De même, le n -ième point du profil se situe à l'emplacement du récepteur. Par conséquent, d_n est la longueur du trajet en km et h_n est la hauteur du terrain à l'emplacement du récepteur, en mètres, au-dessus du niveau de la mer. Si aucune donnée concernant la hauteur représentative du groupe d'obstacles n'est disponible pour un profil de trajet, la valeur $g_i = h_i$.

Etant donné qu'il n'existe pas d'ensembles normalisés de catégories de groupes d'obstacles, les types de groupes d'obstacles ou les hauteurs à utiliser ne sont pas définis dans la présente Recommandation. Il convient de noter que, si on les utilise, les hauteurs de groupes d'obstacles devraient être «représentatives» et de nature à améliorer la précision du modèle et non les hauteurs physiques du groupe d'obstacles représentés. A titre d'indication, les types de groupes d'obstacles figurant dans le Tableau 2 peuvent se révéler utiles. Dans la présente Recommandation, donner la valeur zéro à la hauteur du groupe d'obstacles revient à supprimer l'affaiblissement dû à ce groupe d'obstacles.

TABLEAU 2

Types de groupe d'obstacles représentatifs

Type de groupe d'obstacles	Hauteur représentative du groupe d'obstacles (m)	Modèle de l'affaiblissement dû à un groupe d'obstacles au niveau du terminal
Espace ouvert/milieu rural/étendue d'eau	10	Equation (54b)
Milieu suburbain	10	Equation (54a)
Milieu urbain/arbres/forêt	15	Equation (54a)
Milieu urbain dense	20	Equation (54a)

3.3 Zones radioclimatiques

Il est également nécessaire de disposer d'informations sur la longueur des tronçons du trajet qui sont situés dans les zones radioclimatiques décrites dans le Tableau 3.

TABLEAU 3
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
Zone de terre	A2	Toutes les terres, autres que les «zones côtières» et littorales visées dans la Zone côtière ci-dessus
Mer	B	Mers, océans et autres vastes étendues d'eau (c'est-à-dire couvrant un cercle d'au moins 100 km de diamètre)

Pour assurer le maximum de cohérence entre les résultats obtenus par les diverses administrations, il est fortement recommandé que les calculs de cette procédure soient effectués sur la base de la Carte mondiale numérisée de l'UIT (IDWM, *ITU Digitized World Map*). Cette carte, qui est disponible auprès du Bureau des radiocommunications (BR) de l'UIT, est adaptée à deux environnements informatiques: ordinateurs centraux et ordinateurs personnels. Si tous les points du trajet sont situés au moins à 50 km de la mer ou d'autres vastes étendues d'eau, seule la «Zone de terre» s'applique.

3.4 Distances des terminaux par rapport à la côte

Si le trajet passe au-dessus de la zone B, deux autres paramètres sont requis, d_{ct} , d_{cr} , lesquels donnent les distances respectives de l'émetteur et du récepteur depuis la côte (km), dans la direction de l'autre terminal. Pour une station placée à bord d'un navire ou d'une plate-forme en mer, cette distance est égale à zéro.

3.5 Principaux paramètres radiométéorologiques

Dans le cadre de cette procédure de prévision, deux paramètres radiométéorologiques sont nécessaires pour décrire la variabilité du coïndice de réfraction atmosphérique.

- ΔN (unités N/km), gradient moyen de l'indice de réfraction radioélectrique dans le premier km de l'atmosphère, permet de déterminer le rayon équivalent de la Terre à utiliser pour l'analyse du profil de trajet et de la diffraction par les obstacles. On notera que ΔN est une grandeur positive dans cette procédure.
- Le paramètre N_0 (unités N), coïndice de réfraction 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.

On trouvera dans l'Appendice 1 des cartes mondiales de ΔN et N_0 . Les fichiers de données contenant les cartes numérisées sont disponibles auprès du BR.

3.6 Incidence du phénomène de conduit

La mesure dans laquelle les niveaux du signal augmenteront en raison de conditions de propagation anormales, en particulier en raison du phénomène de conduit, est quantifiée par un paramètre β_0 (%), pourcentage du temps pendant lequel on peut s'attendre, dans les cent premiers mètres de la basse atmosphère, à un gradient de décroissance de l'indice de réfraction supérieur à cent unités N/km. La valeur de β_0 est calculée comme suit.

Calculer le paramètre μ_1 , qui dépend des proportions des tronçons du trajet situés respectivement au-dessus des terres (intérieur des terres et/ou zone côtière) et au-dessus des étendues d'eau:

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

où la valeur de μ_1 doit être limitée à $\mu_1 \leq 1$,

et:

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

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

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

Les zones radioclimatiques à prendre en considération pour déterminer d_{tm} et d_{lm} sont définies dans le Tableau 3. Si tous les points sur le trajet sont situés à 50 km au moins de la mer ou d'autres vastes étendues d'eau, seule la catégorie «Zone de terre» s'applique, et les longueurs d_{tm} et d_{lm} sont égales à la longueur du trajet, d .

Calculer le paramètre μ_4 , qui dépend de μ_1 et de la latitude du point milieu du trajet en degrés:

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

où:

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

Calculer β_0 :

$$\beta_0 = \begin{cases} 10^{-0,015|\varphi| + 1,67} \mu_1 \mu_4 & \% & \text{pour } |\varphi| \leq 70^\circ \\ 4,17 \mu_1 \mu_4 & \% & \text{pour } |\varphi| > 70^\circ \end{cases} \quad (5)$$

3.7 Rayon terrestre équivalent

La valeur médiane, k_{50} , du facteur multiplicatif du rayon terrestre équivalent pour le trajet est obtenue à l'aide de la formule suivante:

$$k_{50} = \frac{157}{157 - \Delta N} \quad (6)$$

La valeur du gradient moyen de l'indice de réfraction radioélectrique, ΔN , peut être obtenue à partir de la Fig. 1, la latitude et la longitude du point milieu du trajet étant alors considérées comme représentatives de la totalité du trajet.

La valeur médiane du rayon terrestre équivalent, a_e , est donnée par:

$$a_e = 6371 \cdot k_{50} \quad \text{km} \quad (7a)$$

La valeur du rayon terrestre équivalent, a_β , dépassée pendant β_0 du temps est donnée par:

$$a_\beta = 6371 \cdot k_\beta \quad \text{km} \quad (7b)$$

où $k_\beta = 3,0$ est une estimation du facteur multiplicatif de la valeur du rayon terrestre équivalent dépassée pendant β_0 du temps.

3.8 Paramètres obtenus à l'issue de l'analyse du profil du trajet

Les valeurs de certains paramètres relatifs au trajet qui sont nécessaires pour les calculs (voir le Tableau 4) doivent être obtenues à l'issue d'une analyse initiale du profil du trajet, sur la base de la valeur de a_e donnée par l'équation (7a). Les informations sur la manière d'obtenir, de construire et d'analyser le profil du trajet sont données dans l'Appendice 2 de la présente Annexe.

TABLEAU 4

Valeur 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_{it}, d_{ir}	Distance entre les antennes de la station d'émission et de la station de réception et leurs horizons respectifs (km)
θ_t, θ_r	Angles d'élévation de l'horizon à l'émission et à la réception (mrad)
θ	Distance angulaire du trajet (mrad)
h_{ts}, h_{rs}	Hauteur du centre des antennes au-dessus du niveau moyen de la mer (m)
h_{tc}, h_{rc}	Valeurs maximales respectivement pour (h_{ts}, g_1) et (h_{rs}, g_n)
h_{te}, h_{re}	Hauteurs équivalentes des antennes au-dessus du terrain (m)
d_b	Longueur cumulée des tronçons du trajet au-dessus d'étendues d'eau (km)
ω	Fraction de la longueur totale du trajet au-dessus d'étendues d'eau: $\omega = d_b / d$ où d est la distance le long du grand cercle (km) calculée à l'aide de l'équation (63). Pour les trajets en totalité terrestres: $\omega = 0$

4 Procédure de prévision

4.1 Considérations générales

La procédure de prévision globale est décrite dans la présente partie. Tout d'abord, l'affaiblissement de transmission de référence, L_b (dB), qui n'est pas dépassé pendant le pourcentage de temps annuel requis, $p\%$, et pour 50% des emplacements, est évalué comme indiqué aux § 4.2-4.6 (qui traitent respectivement des affaiblissements de transmission de référence dus à la propagation en visibilité directe, à la propagation par diffraction, à la propagation par diffusion troposphérique, à la propagation par formation de conduit ou par la réflexion sur les couches et enfin de la combinaison de ces mécanismes de propagation pour prévoir l'affaiblissement de transmission de référence). Ensuite, les méthodes à appliquer pour tenir compte des effets produits par un groupe d'obstacles au niveau du terminal, des effets de la variabilité en fonction des emplacements et de l'affaiblissement dû à la pénétration dans les bâtiments sont exposées aux § 4.7-4.10. Enfin, on trouvera au § 4.11 des expressions qui mettent en corrélation l'affaiblissement de transmission de référence et le champ (dB $\mu\text{V}/\text{m}$) pour une puissance apparente rayonnée de 1 kW.

4.2 Propagation en visibilité directe (y compris les effets à court terme)

Les paramètres qui suivent devraient tous être évalués aussi bien pour des trajets en visibilité directe que pour des trajets transhorizons.

L'affaiblissement de transmission de référence dû à la propagation en espace libre est donné par:

$$L_{bfs} = 92,44 + 20 \log f + 20 \log d \quad \text{dB} \quad (8)$$

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

$$E_{sp} = 2,6 \left(1 - e^{-\frac{d_{it} + d_{ir}}{10}} \right) \log \left(\frac{p}{50} \right) \quad \text{dB} \quad (9a)$$

$$E_{s\beta} = 2,6 \left(1 - e^{-\frac{d_{it} + d_{ir}}{10}} \right) \log \left(\frac{\beta_0}{50} \right) \quad \text{dB} \quad (9b)$$

Calculer l'affaiblissement de transmission de référence dû à la propagation en visibilité directe, non dépassé pendant un $p\%$ du temps (que le trajet soit ou non véritablement en visibilité directe), comme suit:

$$L_{b0p} = L_{bfs} + E_{sp} \quad \text{dB} \quad (10)$$

Calculer l'affaiblissement de transmission de référence dû à la propagation en visibilité directe, non dépassé pendant $\beta_0\%$ du temps (que le trajet soit ou non véritablement en visibilité directe), comme suit:

$$L_{b0\beta} = L_{bfs} + E_{s\beta} \quad \text{dB} \quad (11)$$

4.3 Propagation par diffraction

NOTE 1 – Il a été constaté que la présente méthode, tirée de la Recommandation UIT-R P.452, avait des limites¹, et des travaux sont donc en cours en vue de proposer une méthode améliorée. En particulier, d'autres méthodes de prévision de la propagation par diffraction actuellement à l'étude donneront lieu à une mise à jour de la présente partie.

L'affaiblissement dû à la diffraction est calculé au moyen d'une méthode fondée sur la construction de Deygout pour un nombre maximal de trois arêtes. L'arête principale, qui existe toujours, correspond au point du profil du trajet ayant la valeur la plus élevée du paramètre de diffraction, v . Deux arêtes secondaires peuvent également être présentes de part et d'autre de l'arête principale, côté émetteur et côté récepteur. Les affaiblissements pour une arête en lame de couteau calculés pour les arêtes existantes sont alors combinés à l'aide d'une correction empirique. Cette méthode permet d'obtenir une estimation de l'affaiblissement dû à la diffraction pour tous les types de trajet, y compris ceux passant au-dessus de la mer, des terres ou de zones côtières, et quelle que soit la nature du terrain, uniforme ou irrégulière.

Cette méthode est toujours utilisée pour la valeur médiane du rayon terrestre équivalent, comme indiqué au § 4.3.1. Si une prévision globale est requise pour $p = 50\%$, aucun autre calcul de la diffraction n'est nécessaire.

Dans le cas de figure général où $p < 50\%$, il faut effectuer le calcul une seconde fois pour un facteur multiplicatif du rayon terrestre équivalent égal à 3, comme indiqué au § 4.3.2. Ce second calcul

¹ En particulier, des mesures faites en Suisse ont donné des résultats qui ne correspondaient pas à l'écart type de 15 dB.

permet d'obtenir une estimation de l'affaiblissement dû à la diffraction qui n'est pas dépassé pendant $\beta_0\%$ du temps, β_0 étant obtenu au moyen de l'équation (5).

L'affaiblissement dû à la diffraction 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 § 4.3.3.

La méthode utilise une approximation de l'affaiblissement dû à la diffraction pour une seule arête en lame de couteau en fonction du paramètre sans dimension, v , donné par:

$$J(v) = 6,9 + 20 \log \left(\sqrt{(v - 0,1)^2 + 1} + v - 0,1 \right) \quad (12)$$

Il est à noter que $J(-0,78) \approx 0$, et que cela définit la limite inférieure à laquelle cette approximation devra être utilisée. $J(v)$ est égal à zéro pour $v \leq -0,78$.

4.3.1 Affaiblissement médian dû à la diffraction

L'affaiblissement médian dû à la diffraction, L_{d50} (dB), est calculé à l'aide de la valeur médiane du rayon terrestre équivalent, a_e , donnée par l'équation (7a).

Affaiblissement médian dû à la diffraction pour l'arête principale

Calculer une correction, ζ_m , pour une pente du trajet globale donnée par:

$$\zeta_m = \cos \left(\text{tg}^{-1} \left(10^{-3} \cdot \frac{h_{rc} - h_{tc}}{d} \right) \right) \quad (13)$$

Déterminer l'arête principale et calculer son paramètre de diffraction, v_{m50} , donné par:

$$v_{m50} = \max_{i=2}^{n-1} \left(\zeta_m H_i \sqrt{\frac{2 \times 10^{-3} d}{\lambda d_i (d - d_i)}} \right) \quad (14)$$

où le dégagement vertical, H_i , est:

$$H_i = g_i + 10^3 \frac{d_i (d - d_i)}{2a_e} - \frac{h_{tc} (d - d_i) + h_{rc} \cdot d_i}{d} \quad (14a)$$

et:

λ : longueur d'onde (m) = $0,3/f$

f : fréquence (GHz)

d : longueur du trajet (km)

d_i : distance du i -ème point du profil depuis l'émetteur (km) (voir le § 3.2)

$h_{tc,rc}$: valeurs maximales pour respectivement ($h_{ts,rs}, g_{1,n}$).

Donner à i_{m50} la valeur de l'indice du point du profil, avec une valeur maximale, v_{m50} .

Calculer l'affaiblissement médian dû à la diffraction pour une arête principale en lame de couteau, L_{m50} , donné par:

$$\begin{aligned} L_{m50} &= J(v_{m50}) && \text{si } v_{m50} \geq -0,78 \\ &= 0 && \text{dans les autres cas} \end{aligned} \quad (15)$$

Si $L_{m50} = 0$, l'affaiblissement médian dû à la diffraction, L_{d50} , et l'affaiblissement dû à la diffraction non dépassé pendant $\beta_0\%$ du temps, $L_{d\beta}$, sont tous deux égaux à zéro, auquel cas il n'y a pas lieu d'effectuer d'autres calculs de la diffraction.

Dans les autres cas, il convient de rechercher les affaiblissements supplémentaires possibles dus aux arêtes secondaires, de part et d'autre de l'arête principale coté émetteur et côté récepteur, comme suit.

Affaiblissement médian dû à la diffraction pour une arête secondaire côté émetteur

Si $i_{m50} = 2$, l'arête secondaire côté émetteur n'existe pas et la valeur de l'affaiblissement correspondant dû à la diffraction, L_{t50} , doit être égale à zéro. Dans tous les autres cas, le calcul à effectuer est le suivant: calculer une correction, ζ_t , pour la pente du trajet depuis l'émetteur jusqu'à l'arête principale:

$$\zeta_t = \cos \left(\operatorname{tg}^{-1} \left(10^{-3} \cdot \frac{g_{im50} - h_{tc}}{d_{im50}} \right) \right) \quad (16)$$

Déterminer l'arête secondaire côté émetteur et calculer son paramètre de diffraction, v_{t50} , donné par:

$$v_{t50} = \max_{i=2}^{i_{m50}-1} \left(\zeta_t H_i \sqrt{\frac{2 \times 10^{-3} d_{im50}}{\lambda d_i \cdot (d_{im50} - d_i)}} \right) \quad (17)$$

où:

$$H_i = g_i + 10^3 \frac{d_i (d_{im50} - d_i)}{2a_e} - \frac{h_{tc} (d_{im50} - d_i) + g_{im50} \cdot d_i}{d_{im50}} \quad (17a)$$

Donner à i_{t50} la valeur de l'indice du point du profil pour l'arête secondaire côté émetteur (c'est-à-dire l'indice de la hauteur du terrain où est situé cet élément de réseau correspondant à la valeur v_{t50}).

Calculer l'affaiblissement médian dû à la diffraction pour l'arête secondaire en lame de couteau côté émetteur, L_{t50} , donné par:

$$\begin{aligned} L_{t50} &= J(v_{t50}) && \text{si } v_{t50} \geq -0,78 \text{ et } i_{m50} > 2 \\ &= 0 && \text{dans les autres cas} \end{aligned} \quad (18)$$

Affaiblissement médian dû à la diffraction pour l'arête secondaire côté récepteur

Si $i_{m50} = n - 1$, l'arête secondaire côté récepteur n'existe pas et la valeur de l'affaiblissement correspondant dû à la diffraction, L_{r50} , doit être égale à zéro. Dans tous les autres cas, le calcul à effectuer est le suivant: calculer une correction, ζ_r , pour la pente du trajet depuis l'arête principale jusqu'au récepteur:

$$\zeta_r = \cos \left(\operatorname{tg}^{-1} \left(10^{-3} \cdot \frac{h_{rc} - g_{im50}}{d - d_{im50}} \right) \right) \quad (19)$$

Déterminer l'arête secondaire côté récepteur et calculer son paramètre de diffraction, v_{r50} , donné par:

$$v_{r50} = \max_{i=i_{m50}+1}^{n-1} \left(\zeta_r H_i \sqrt{\frac{2 \times 10^{-3} (d - d_{im50})}{\lambda (d_i - d_{im50}) (d - d_i)}} \right) \quad (20)$$

où:

$$H_i = g_i + 10^3 \frac{(d_i - d_{im50})(d - d_i)}{2a_e} - \frac{g_{im50} (d - d_i) + h_{rc} (d_i - d_{im50})}{d - d_{im50}} \quad (20a)$$

Donner à i_{r50} la valeur de l'indice du point du profil pour l'arête secondaire côté récepteur (c'est-à-dire l'indice de la hauteur du terrain où est situé cet élément de réseau correspondant à la valeur v_{r50}).

Calculer l'affaiblissement médian dû à la diffraction pour l'arête secondaire en lame de couteau côté récepteur, L_{r50} , donné par:

$$\begin{aligned} L_{r50} &= J(v_{r50}) && \text{si } v_{r50} \geq -0,78 \text{ et } i_{m50} < n-1 \\ &= 0 && \text{dans les autres cas} \end{aligned} \quad (21)$$

Somme des affaiblissements obtenus pour les arêtes pour une valeur médiane de la courbure de la Terre

Calculer l'affaiblissement médian dû à la diffraction, L_{d50} , donné par:

$$\begin{aligned} L_{d50} &= L_{m50} + \left(1 - e^{-\frac{L_{m50}}{6}} \right) (L_{t50} + L_{r50} + 10 + 0,04d) && \text{si } v_{m50} > -0,78 \\ &= 0 && \text{dans les autres cas} \end{aligned} \quad (22)$$

Dans l'équation (22), la valeur L_{t50} sera égale à zéro si l'arête secondaire côté émetteur n'existe pas et la valeur L_{r50} sera, elle aussi, égale à zéro si l'arête secondaire côté récepteur n'existe pas.

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

Si la prévision est requise seulement pour $p = 50\%$, il n'y aura pas lieu de procéder à d'autres calculs de l'affaiblissement dû à la diffraction (voir le § 4.3.3). Dans les autres cas, il faut calculer l'affaiblissement dû à la diffraction qui n'est pas dépassé pendant $\beta_0\%$ du temps comme suit.

4.3.2 Affaiblissement dû à la diffraction qui n'est pas dépassé pendant $\beta_0\%$ du temps

On calcule l'affaiblissement dû à la diffraction qui n'est pas dépassé pendant $\beta_0\%$ du temps au moyen de la valeur du rayon terrestre équivalent dépassée pendant $\beta_0\%$ du temps, a_β , donnée par l'équation (7b). Pour ce deuxième calcul de la diffraction, il convient d'utiliser les mêmes arêtes que celles déterminées pour le cas de l'affaiblissement médian dû à la diffraction selon la construction Deygout. On calcule ensuite cet affaiblissement dû à la diffraction comme suit.

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

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

$$v_{m\beta} = \zeta_m H_{im\beta} \sqrt{\frac{2 \times 10^{-3} d}{\lambda d_{im50} (d - d_{im50})}} \quad (23)$$

où:

$$H_{im\beta} = g_{im50} + 10^3 \frac{d_{im50} (d - d_{im50})}{2a_\beta} - \frac{h_{tc} (d - d_{im50}) + h_{rc} \cdot d_{im50}}{d} \quad (23a)$$

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

$$\begin{aligned} L_{m\beta} &= J(v_{m\beta}) && \text{si } v_{m\beta} \geq -0,78 \\ &= 0 && \text{dans les autres cas} \end{aligned} \quad (24)$$

Affaiblissement dû à la diffraction, qui n'est pas dépassé pendant $\beta_0\%$ du temps, pour l'arête secondaire côté émetteur

Si $L_{t50} = 0$, la valeur de $L_{t\beta}$ sera égale à zéro. Dans les autres cas, calculer le paramètre de diffraction pour l'arête secondaire côté émetteur, $v_{t\beta}$, donné par:

$$v_{t\beta} = \zeta_t H_{it\beta} \sqrt{\frac{2 \times 10^{-3} d_{im50}}{\lambda d_{it50} (d_{im50} - d_{it50})}} \quad (25)$$

où:

$$H_{it\beta} = g_{it50} + 10^3 \frac{d_{it50} (d_{im50} - d_{it50})}{2a_\beta} - \frac{h_{tc} (d_{im50} - d_{it50}) + g_{im50} \cdot d_{it50}}{d_{im50}} \quad (25a)$$

Calculer l'affaiblissement dû à la diffraction pour l'arête secondaire en lame de couteau côté émetteur, $L_{t\beta}$, donné par:

$$\begin{aligned} L_{t\beta} &= J(v_{t\beta}) && \text{si } v_{t\beta} \geq -0,78 \\ &= 0 && \text{dans les autres cas} \end{aligned} \quad (26)$$

Affaiblissement dû à la diffraction, qui n'est pas dépassé pendant $\beta_0\%$ du temps, pour l'arête secondaire côté récepteur

Si $L_{r50} = 0$, la valeur de $L_{r\beta}$ sera égale à zéro. Dans les autres cas, calculer le paramètre de diffraction pour l'arête secondaire côté récepteur, $v_{r\beta}$, donné par:

$$v_{r\beta} = \zeta_r H_{ir\beta} \sqrt{\frac{2 \times 10^{-3} (d - d_{im50})}{\lambda (d_{ir50} - d_{im50}) (d - d_{ir50})}} \quad (27)$$

où:

$$H_{ir\beta} = g_{ir50} + 10^3 \frac{(d_{ir50} - d_{im50})(d - d_{ir50})}{2a_\beta} - \frac{g_{im50} (d - d_{ir50}) + h_{rc} (d - d_{im50})}{d - d_{im50}} \quad (27a)$$

Calculer l'affaiblissement dû à la diffraction pour l'arête secondaire en lame de couteau côté récepteur, $L_{r\beta}$, donné par:

$$\begin{aligned} L_{r\beta} &= J(v_{r\beta}) && \text{si } v_{r\beta} \geq -0,78 \\ &= 0 && \text{dans les autres cas} \end{aligned} \quad (28)$$

Somme des affaiblissements obtenus pour les arêtes non dépassés pendant $\beta_0\%$ du temps

Calculer l'affaiblissement dû à la diffraction qui n'est pas dépassé pendant $\beta_0\%$ du temps, $L_{d\beta}$, donné par:

$$L_{d\beta} = L_{m\beta} + \left(1 - e^{-\frac{L_{m\beta}}{6}} \right) (L_{t\beta} + L_{r\beta} + 10 + 0,04d) \quad \text{si } v_{m\beta} > -0,78 \quad (29)$$

$$= 0 \quad \text{dans les autres cas}$$

4.3.3 Affaiblissement dû à la diffraction qui n'est pas dépassé pendant $p\%$ du temps

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

$$F_i = 0 \quad \text{si } p = 50\% \quad (30a)$$

$$= \frac{I\left(\frac{p}{100}\right)}{I\left(\frac{\beta_0}{100}\right)} \quad \text{si } 50\% > p > \beta_0\% \quad (30b)$$

$$= 1 \quad \text{si } \beta_0\% \geq p \quad (30c)$$

où $I(x)$ est la distribution normale cumulative complémentaire inverse en fonction de la probabilité x . On trouvera dans l'Appendice 3 de la présente Annexe une approximation de $I(x)$, que l'on peut utiliser en toute confiance pour $x \leq 0,5$.

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

$$L_{dp} = L_{d50} + (L_{d\beta} - L_{d50}) F_i \quad \text{dB} \quad (31)$$

où les valeurs L_{d50} et $L_{d\beta}$ sont respectivement définies par les équations (22) et (29), et où F_i est défini par les équations (30a-c), selon les valeurs de p et de β_0 .

L'affaiblissement médian de transmission de référence associé à la diffraction, L_{bd50} , est donné par la formule suivante:

$$L_{bd50} = L_{bfs} + L_{d50} \quad \text{dB} \quad (32)$$

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

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

$$L_{bd} = L_{b0p} + L_{dp} \quad \text{dB} \quad (33)$$

où L_{b0p} est donné par l'équation (10).

4.4 Propagation par diffusion troposphérique

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

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:

$$L_{bs} = 190,1 + L_f + 20 \log d + 0,573 \theta - 0,15 N_0 - 10,125 \left(\log \left(\frac{50}{p} \right) \right)^{0,7} \quad \text{dB} \quad (34)$$

où:

L_f : affaiblissement en fonction de la fréquence:

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

N_0 : indice de réfraction ramené au niveau de la mer, à mi-trajet (voir la Fig. 2).

4.5 Propagation par formation de conduits ou par réflexion sur les couches

L'affaiblissement de transmission de référence lié à un phénomène de conduit ou à la réflexion sur les couches, non dépassé pendant $p\%$ du temps, L_{ba} (dB), est donné par:

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

où:

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

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

A_{lf} : correction empirique pour tenir compte de l'augmentation de l'affaiblissement en fonction de la longueur d'onde dans la propagation par conduits

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

$$A_{lf}(f) = 0,0 \text{ dB} \quad \text{dans les autres cas}$$

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

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

où:

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

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

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

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

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

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

On notera l'ensemble limité de conditions pour lequel l'équation (39) est nécessaire.

$A_d(p)$: affaiblissements en fonction du pourcentage de temps et de la distance angulaire, dans le cadre du mécanisme de propagation anormale:

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

où:

γ_d : affaiblissement linéique:

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

θ' : distance angulaire (corrigée, le cas échéant à l'aide de l'équation (38a)), pour permettre l'application du modèle d'effet d'écran du terrain de l'équation (36):

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

où:

$$\varepsilon = 3,5$$

τ : défini dans l'équation (3) et α doit toujours être égal ou supérieur à $-3,4$

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

$$\mu_3 = \begin{cases} 1 & \text{pour } h_m \leq 10 \text{ m} \\ e^{-4,6 \times 10^{-5} (h_m - 10) (43 + 6d_I)} & \text{pour } h_m > 10 \text{ m} \end{cases} \quad (46)$$

et:

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

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

4.6 Affaiblissement de transmission de référence non dépassé pendant $p\%$ du temps et pour 50% des emplacements, sans tenir compte des effets du groupe d'obstacles au niveau du terminal

Il convient d'appliquer la procédure ci-après aux résultats des calculs qui vont suivre pour tous les trajets, afin d'obtenir l'affaiblissement de transmission de référence non dépassé pendant $p\%$ du temps et pour 50% des emplacements. Pour éviter la présence de discontinuités aberrantes, au regard des conditions physiques, dans les affaiblissements de transmission de référence théoriques prévus, les modèles de propagation qui suivent doivent être fusionnés de façon à obtenir pour ces affaiblissements de transmission de référence des valeurs modifiées permettant d'effectuer une prévision globale pendant $p\%$ du temps et pour 50% des emplacements.

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

$$F_j = 1,0 - 0,5 \left(1,0 + \text{th} \left(3,0 \cdot \xi \cdot \frac{(\theta - \Theta)}{\Theta} \right) \right) \quad (47)$$

où:

Θ : paramètre fixe déterminant la plage angulaire du modèle fusionné; mettre à la valeur 0,3

ξ : paramètre fixe déterminant la pente pour le modèle fusionné à l'extrémité de la plage; mettre à la valeur 0,8

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

Calculer un facteur d'interpolation, F_k , pour tenir compte du trajet le long du grand cercle:

$$F_k = 1,0 - 0,5 \left(1,0 + \text{th} \left(3,0 \cdot \kappa \cdot \frac{(d - d_{sw})}{d_{sw}} \right) \right) \quad (48)$$

où:

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

d_{sw} : paramètre fixe déterminant la plage des distances pour le modèle fusionné; mettre à la valeur 20

κ : paramètre fixe déterminant la pente pour le modèle fusionné aux extrémités de la plage; mettre à la valeur 0,5.

Calculer un affaiblissement de transmission de référence minimal théorique, L_{minb0p} (dB), associé à la propagation en visibilité directe et à un phénomène de diffraction sur un sous-trajet passant au-dessus de la mer:

$$L_{minb0p} = \begin{cases} L_{b0p} + (1 - \omega)L_{dp} & \text{pour } p < \beta_0 \\ L_{bd50} + (L_{b0\beta} + (1 - \omega)L_{dp} - L_{bd50}) \cdot F_i & \text{pour } p \geq \beta_0 \end{cases} \quad \text{dB} \quad (49)$$

où:

- L_{b0p} : affaiblissement de transmission de référence théorique pour un trajet en visibilité directe, non dépassé pendant $p\%$ du temps, donné par l'équation (10)
- $L_{b0\beta}$: affaiblissement de transmission de référence théorique pour un trajet en visibilité directe, non dépassé pendant $\beta_0\%$ du temps, donné par l'équation (11)
- L_{dp} : affaiblissement dû à la diffraction non dépassé pendant $p\%$ du temps, équation (31), calculé à l'aide de la méthode exposée au § 4.3
- L_{bd50} : affaiblissement médian de transmission de référence lié à la diffraction, équation (32), calculé à l'aide de la méthode exposée au § 4.3
- F_i : facteur d'interpolation de la diffraction pour deux valeurs possibles du rayon terrestre équivalent, donné par l'équation (30).

Calculer un affaiblissement de transmission de référence minimal théorique, L_{minbap} (dB), associé aux renforcements du signal pour un trajet en visibilité directe ou transhorizon:

$$L_{minbap} = \eta \cdot \ln \left(e^{\left(\frac{L_{ba}}{\eta} \right)} + e^{\left(\frac{L_{b0p}}{\eta} \right)} \right) \quad \text{dB} \quad (50)$$

où:

- L_{ba} : affaiblissement de transmission de référence dû à la formation de conduits ou à la réflexion sur les couches, non dépassé pendant $p\%$ du temps, donné par l'équation (36)
 - L_{b0p} : affaiblissement de transmission de référence théorique dû à la propagation en visibilité directe, non dépassé pendant $p\%$ du temps, donné par l'équation (10)
- $\eta = 2,5$.

Calculer un affaiblissement de transmission de référence théorique, L_{bda} (dB), associé à des renforcements en cas de propagation par diffraction, de propagation en visibilité directe ou de formation de conduits/de réflexion sur les couches:

$$L_{bda} = \begin{cases} L_{bd} & \text{pour } L_{minbap} > L_{bd} \\ L_{minbap} + (L_{bd} - L_{minbap}) \cdot F_k & \text{pour } L_{minbap} \leq L_{bd} \end{cases} \quad \text{dB} \quad (51)$$

où:

- L_{bd} : affaiblissement de transmission de référence dû à la diffraction, non dépassé pendant $p\%$ du temps, obtenu à l'aide de l'équation (33)

- L_{minbap} : affaiblissement de transmission de référence minimal théorique associé aux renforcements du signal pour un trajet en visibilité directe ou transhorizon, obtenu à l'aide de l'équation (50)
- F_k : facteur d'interpolation donné par l'équation (48), en fonction de la valeur de la longueur du trajet le long du grand cercle, d .

Calculer un affaiblissement de transmission de référence modifié, L_{bam} (dB), qui tient compte des renforcements en cas de propagation par diffraction, de propagation en visibilité directe ou de formation de conduits/de réflexion sur les couches:

$$L_{bam} = L_{bda} + (L_{minb0p} - L_{bda}) \cdot F_j \quad \text{dB} \quad (52)$$

où:

- L_{bda} : affaiblissement de transmission de référence théorique associé aux renforcements en cas de propagation par diffraction, de propagation en visibilité directe ou de formation de conduits/de réflexion sur les couches, donné par l'équation (51)
- L_{minb0p} : affaiblissement de transmission de référence minimal théorique associé à des conditions de propagation en visibilité directe et à un phénomène de diffraction sur un sous-trajet passant au-dessus de la mer, donné par l'équation (49)
- F_j : facteur d'interpolation donné par l'équation (47), en fonction de la valeur de la distance angulaire du trajet, θ .

Calculer l'affaiblissement de transmission de référence non dépassé pendant $p\%$ du temps et pour 50% des emplacements, sans tenir compte des effets du groupe d'obstacles au niveau du terminal, L_{bu} (dB), tel qu'il est donné par l'équation suivante:

$$L_{bu} = -5 \log(10^{-0,2 L_{bs}} + 10^{-0,2 L_{bam}}) \quad \text{dB} \quad (53)$$

où:

- L_{bs} : affaiblissement de transmission de référence dû à la diffusion troposphérique non dépassé pendant $p\%$ du temps, donné par l'équation (34)
- L_{bam} : affaiblissement de transmission de référence modifié, compte tenu des renforcements en cas de propagation par diffraction, de propagation en visibilité directe ou de formation de conduits/de réflexion sur les couches, donné par l'équation (52).

4.7 Affaiblissements dus au groupe d'obstacles au niveau du terminal

Lorsque l'antenne de la station d'émission ou de réception est située au-dessous de la hauteur R_t ou R_r représentative de la couverture au sol autour de ces stations, on calcule les affaiblissements dus au groupe d'obstacles présent au niveau de l'émetteur ou du récepteur, A_{ht} , A_{hr} , comme suit. La même méthode s'applique aussi bien à l'émetteur qu'au récepteur et dans les équations suivantes, $A_h = A_{ht}$ ou A_{hr} , $h = h_{tg}$ ou h_{rg} et $R = R_t$ ou R_r selon le cas.

Si $h \geq R$ alors $A_h = 0$

Si $h < R$ alors A_h peut avoir l'une des deux formes suivantes, en fonction du type de groupe d'obstacles (voir le Tableau 2):

$$A_h = J(v) - 6,03 \quad \text{dB} \quad (54a)$$

où:

$$A_h = -K_{h2} \log(h/R) \quad \text{dB} \quad (54b)$$

$J(v)$ est calculé à l'aide de l'équation (12).

Les valeurs v et K_{h2} sont données par:

$$v = K_{nu} \sqrt{h_{dif} \theta_{clut}} \quad (54c)$$

$$h_{dif} = R - h \quad \text{m} \quad (54d)$$

$$\theta_{clut} = \text{tg}^{-1} (h_{dif} / 27) \quad \text{degrés} \quad (54e)$$

$$K_{h2} = 21,8 + 6,2 \log (f) \quad (54f)$$

$$K_{nu} = 0,342 \sqrt{f} \quad (54g)$$

où:

f : fréquence (GHz).

La forme de l'équation (54a) représente l'affaiblissement de Fresnel dû à la diffraction au-dessus d'un obstacle et s'appliquerait à des catégories de groupes d'obstacles comme les bâtiments. Le fouillis urbain en particulier relèverait de cette catégorie.

On utilise l'équation (54b) pour représenter la fonction du gain de surélévation au-dessous du premier pic de brouillage qui correspond au brouillage causé par deux rayons depuis le sol. Il ne s'agit pas véritablement d'une question d'obstacle, mais cette façon simple de procéder permet de traiter cette situation de la même façon qu'un groupe d'obstacles. Si nécessaire, cette équation serait utilisée moyennant la définition d'un type de groupe d'obstacles «assimilé» assorti d'une «hauteur du groupe d'obstacles», R , représentant en fait la hauteur du premier lobe de brouillage.

L'affaiblissement de transmission de référence non dépassé pendant $p\%$ du temps et pour 50% des emplacements, y compris les effets des affaiblissements dus aux groupes d'obstacles situés au niveau du terminal, L_{bc} (dB), est donné par:

$$L_{bc} = L_{bu} + A_{ht} + A_{hr} \quad \text{dB} \quad (55)$$

où:

- L_{bu} : affaiblissement de transmission de référence non dépassé pendant $p\%$ du temps et pour 50% des emplacements à la hauteur (ou au-dessus, selon le cas) du groupe d'obstacles représentatif, donné par l'équation (53)
- $A_{ht,hr}$: affaiblissements supplémentaires pour tenir compte d'un groupe d'obstacles occultant l'émetteur ou le récepteur (équations (54a) et (54b) selon le cas). En l'absence de cet effet d'écran, ces valeurs doivent être égales à zéro.

4.8 Affaiblissements compte tenu de la variabilité en fonction de l'emplacement

Dans la présente Recommandation, et en règle générale, la notion de variabilité en fonction de l'emplacement renvoie aux statistiques spatiales des variations locales de la couverture du terrain. Cette notion est utile pour des variations beaucoup plus importantes que celles de la couverture du terrain et par rapport auxquelles les variations sur le trajet sont négligeables. Etant donné que, par

définition, elle exclut les variations liées à la propagation par trajets multiples, la variabilité en fonction des emplacements ne dépend pas de la largeur de bande du système.

Pour la planification des systèmes radioélectriques, il faudra également tenir compte des effets de la propagation par trajets multiples. Leur incidence, qui dépend de la largeur de bande, de la modulation et du schéma de codage, variera selon les systèmes. On trouvera des éléments d'orientation sur la modélisation de ces effets dans la Recommandation UIT-R P.1406.

Une étude approfondie des données montre que, en raison des variations de la couverture du terrain, la distribution du champ médian sur une telle zone dans des environnements urbains ou suburbains suit approximativement une distribution log-normale à moyenne nulle.

Les valeurs de l'écart type dépendent de la fréquence et de l'environnement, et des études empiriques ont fait apparaître un étalement considérable. Les valeurs représentatives pour des zones de 500 m de côté sont données par l'expression suivante:

$$\sigma_L = K + 1,3 \log(f) \quad \text{dB} \quad (56)$$

où:

$K = 5,1$ pour des stations de réception dont les antennes ont une hauteur inférieure à celle du groupe d'obstacles dans des environnements urbains ou suburbains pour des systèmes mobiles à antennes de toit équidirectives

$K = 4,9$ pour des stations de réception à antennes de toit dont la hauteur est proche de celle du groupe d'obstacles

$K = 4,4$ pour des stations de réception en zones rurales

f : fréquence requise (GHz).

Si la variabilité s'applique à une zone de plus de 500 m de côté ou si la variabilité est rapportée à toutes les zones dans un périmètre donné indépendamment des variations d'une zone à une autre, la valeur de σ_L sera plus grande. Il ressort de données empiriques que la variabilité en fonction des emplacements augmente (par rapport aux valeurs pour de petites zones) jusqu'à 4 dB pour un rayon de 2 km et jusqu'à 8 dB pour un rayon de 50 km.

Le pourcentage des emplacements, p_L , peut varier entre 1% et 99%. Ce modèle n'est pas valable pour un pourcentage d'emplacements inférieur à 1% ou supérieur à 99%.

Il convient de noter que, pour certains besoins de planification (plans d'allotissements multilatéraux), il faudra généralement utiliser une définition de la «variabilité en fonction de l'emplacement» qui tienne compte dans une certaine mesure des évanouissements dus à la propagation par trajets multiples. Plusieurs situations seront ainsi prises en compte: récepteur mobile, en mode stationnaire en l'absence d'effets de propagation par trajets multiples, ou antenne de toit avec réception sur plusieurs fréquences qui ne peut pas être positionnée de façon optimale pour toutes ces fréquences. En outre, il faudra aussi tenir compte de la variabilité sur une zone plus étendue que celle prise pour hypothèse dans la présente Recommandation.

Dans ce contexte, les valeurs indiquées dans le Tableau 5 conviennent pour la planification d'un certain nombre de services de radiocommunication.

TABLEAU 5

**Valeurs des écarts types concernant la variabilité en fonction des emplacements
utilisées dans certaines situations de planification**

	Ecart type		
	100 MHz	600 MHz	2 000 MHz
Radiodiffusion, analogique (dB)	8,3	9,5	–
Radiodiffusion, numérique (dB)	5,5	5,5	5,5

La correction de la variabilité en fonction des emplacements ne devrait pas être appliquée lorsque le récepteur, ou le système mobile, est situé dans une zone adjacente à la mer.

Lorsque le récepteur, ou le système mobile, est situé sur la terre en extérieur, mais à une hauteur au-dessus du sol qui est supérieure ou égale à celle du groupe d'obstacles représentatif, on peut raisonnablement s'attendre à ce que la variabilité en fonction des emplacements diminuera régulièrement à mesure que la hauteur augmente et qu'elle finira par, à un moment donné, disparaître. Dans la présente Recommandation, la variation de la hauteur liée à la variabilité en fonction des emplacements, $u(h)$, est donnée par:

$$\begin{aligned}
 u(h) &= 1 && \text{pour } 0 \leq h < R \\
 u(h) &= 1 - \frac{(h-R)}{10} && \text{pour } R \leq h < R+10 \\
 u(h) &= 0 && \text{pour } R+10 \leq h
 \end{aligned} \tag{57}$$

où R (m) est la hauteur du groupe d'obstacles représentatif situé à l'emplacement du récepteur ou du système mobile. Par conséquent, pour un récepteur ou un système mobile en extérieur, il convient de multiplier l'écart type concernant la variabilité en fonction des emplacements, σ_L , tel qu'il est donné par l'équation (56) ou dans le Tableau 5, par la fonction de la variation de la hauteur, $u(h)$, donnée par l'équation (57), lorsque l'on calcule les valeurs de l'affaiblissement de transmission de référence pour des valeurs de $p_L\%$ qui ne sont pas égales à 50%.

4.9 Affaiblissement dû à la pénétration dans les bâtiments

L'affaiblissement dû à la pénétration dans les bâtiments désigne l'écart (dB) entre le champ moyen (rapporté aux emplacements) à l'extérieur d'un bâtiment à une hauteur donnée au-dessus du niveau du sol et le champ moyen à l'intérieur du même bâtiment (rapporté aux emplacements) pour la même hauteur au-dessus du niveau du sol.

En ce qui concerne la *réception en intérieur*, il faut en outre tenir compte de deux paramètres importants: l'affaiblissement dû à la pénétration dans les bâtiments et la variation de cet affaiblissement en raison des différents matériaux de construction. Les écarts types, indiqués ci-dessous, tiennent compte de l'étalement important des valeurs de l'affaiblissement dû à la pénétration dans les bâtiments, mais non de la variabilité des emplacements à l'intérieur de différents bâtiments. Il y a lieu de noter que l'on dispose d'un nombre limité de données et de calculs fiables concernant l'affaiblissement dû à la pénétration dans les bâtiments. A titre provisoire, des valeurs de l'affaiblissement dû à la pénétration dans les bâtiments susceptibles d'être utilisées sont données dans le Tableau 6.

TABLEAU 6

Valeurs de l'affaiblissement dû à la pénétration dans les bâtiments⁽¹⁾, L_{be} , σ_{be}

F	Valeur médiane, L_{be} (dB)	Ecart type, σ_{be} (dB)
0,2 GHz	9	3
0,6 GHz	11	6
1,5 GHz	11	6

⁽¹⁾ Ces valeurs appelleront peut-être une mise à jour, lorsque davantage de données expérimentales seront disponibles.

Pour des fréquences au-dessous de 0,2 GHz, $L_{be} = 9$ dB, $\sigma_{be} = 3$ dB; pour des fréquences au-dessus de 1,5 GHz, $L_{be} = 11$ dB, $\sigma_{be} = 6$ dB. Entre 0,2 GHz et 0,6 GHz (et entre 0,6 GHz et 1,5 GHz), les valeurs correctes pour L_{be} et σ_{be} peuvent être obtenues par interpolation linéaire entre les valeurs de L_{be} et σ_{be} données dans le tableau pour 0,2 GHz et 0,6 GHz (0,6 GHz et 1,5 GHz).

La variation du champ pour la réception en intérieur est la résultante de la variation en extérieur (σ_L) et de la variation correspondant à l'affaiblissement dû aux bâtiments (σ_{be}). Il est peu probable que ces variations soient corrélées. Il est donc possible de calculer l'écart type pour la réception en intérieur en prenant (σ_i) la racine carrée de la somme des carrés de chaque écart type.

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_{be}^2} \quad (58)$$

où σ_L est l'écart type de la variabilité en fonction des emplacements, donné par l'équation (56) ou le Tableau 5.

Par exemple, pour des émissions numériques sur une largeur de bande supérieure à 1 MHz, en ondes métriques, lorsque les écarts types des signaux sont respectivement de 5,5 dB et 3 dB, la valeur combinée s'établit alors à 6,3 dB. Dans la bande IV/V, lorsque les écarts types de signaux sont respectivement de 5,5 dB et 6 dB, la valeur combinée s'établit alors à 8,1 dB.

4.10 Affaiblissement de transmission de référence non dépassé pendant $p\%$ du temps et pour $p_L\%$ des emplacements

Pour calculer le pourcentage souhaité d'emplacements, l'affaiblissement médian, L_{loc} , et l'écart type, σ_{loc} , sont donnés par:

$$L_{loc} = 0 \quad (\text{en extérieur}) \quad (59a)$$

$$L_{loc} = L_{be} \quad (\text{en intérieur}) \quad (59b)$$

et:

$$\sigma_{loc} = u(h) \cdot \sigma_L \quad (\text{en extérieur}) \quad (60a)$$

$$\sigma_{loc} = \sigma_i \quad (\text{en intérieur}) \quad (60b)$$

lorsque l'affaiblissement médian, L_{be} , dû à la pénétration dans les bâtiments, est donné dans le Tableau 6, la fonction de la hauteur, $u(h)$, est donnée par l'équation (57) et les écarts types, σ_L et σ_i , sont respectivement donnés par l'équation (56) (ou dans le Tableau 5) et l'équation (58).

L'affaiblissement de transmission de référence non dépassé pendant $p\%$ du temps et $p_L\%$ d'emplacements, L_b (dB), est donné par:

$$L_b = \max \left\{ L_{b0p}, L_{bc} + L_{loc} - I \left(\frac{p_L}{100} \right) \cdot \sigma_{loc} \right\} \quad \text{dB} \quad (61)$$

où:

- L_{b0p} : affaiblissement de transmission de référence non dépassé pendant $p\%$ du temps et pour 50% d'emplacements dû à la propagation en visibilité directe avec des renforcements à court terme, donné par l'équation (10)
- L_{bc} : affaiblissement de transmission de référence non dépassé pendant $p\%$ du temps et pour 50% des emplacements, y compris les effets des affaiblissements dus à un groupe d'obstacles au niveau du terminal, donné par l'équation (55)
- L_{loc} : valeur médiane de l'affaiblissement en fonction de l'emplacement, donnée par les équations (59a) et (59b)
- $I(x)$: fonction de distribution normale cumulative complémentaire inverse qui est fonction de la probabilité, x . Une approximation pour $I(x)$ susceptible d'être utilisée pour $0,000001 \leq x \leq 0,999999$ est donnée dans l'Appendice 3 à cette Annexe
- σ_{loc} : écart type combiné (affaiblissement dû à la pénétration dans les bâtiments et variabilité en fonction des emplacements) donné par les équations (60a) et (60b).

Le pourcentage des emplacements, p_L , peut varier entre 1% et 99%. Ce modèle n'est pas valable pour un pourcentage d'emplacements inférieur à 1% ou supérieur à 99%.

4.11 Champ dépassé pendant $p\%$ du temps et pour $p_L\%$ d'emplacements

Le champ rapporté à une puissance apparente rayonné de 1 kW dépassé pendant $p\%$ du temps et pour 50% des emplacements, E_p dB(μ V/m), peut être calculé à l'aide de l'équation suivante:

$$E_p = 199,36 + 20 \log(f) - L_b \quad \text{dB}(\mu\text{V/m}) \quad (62)$$

où:

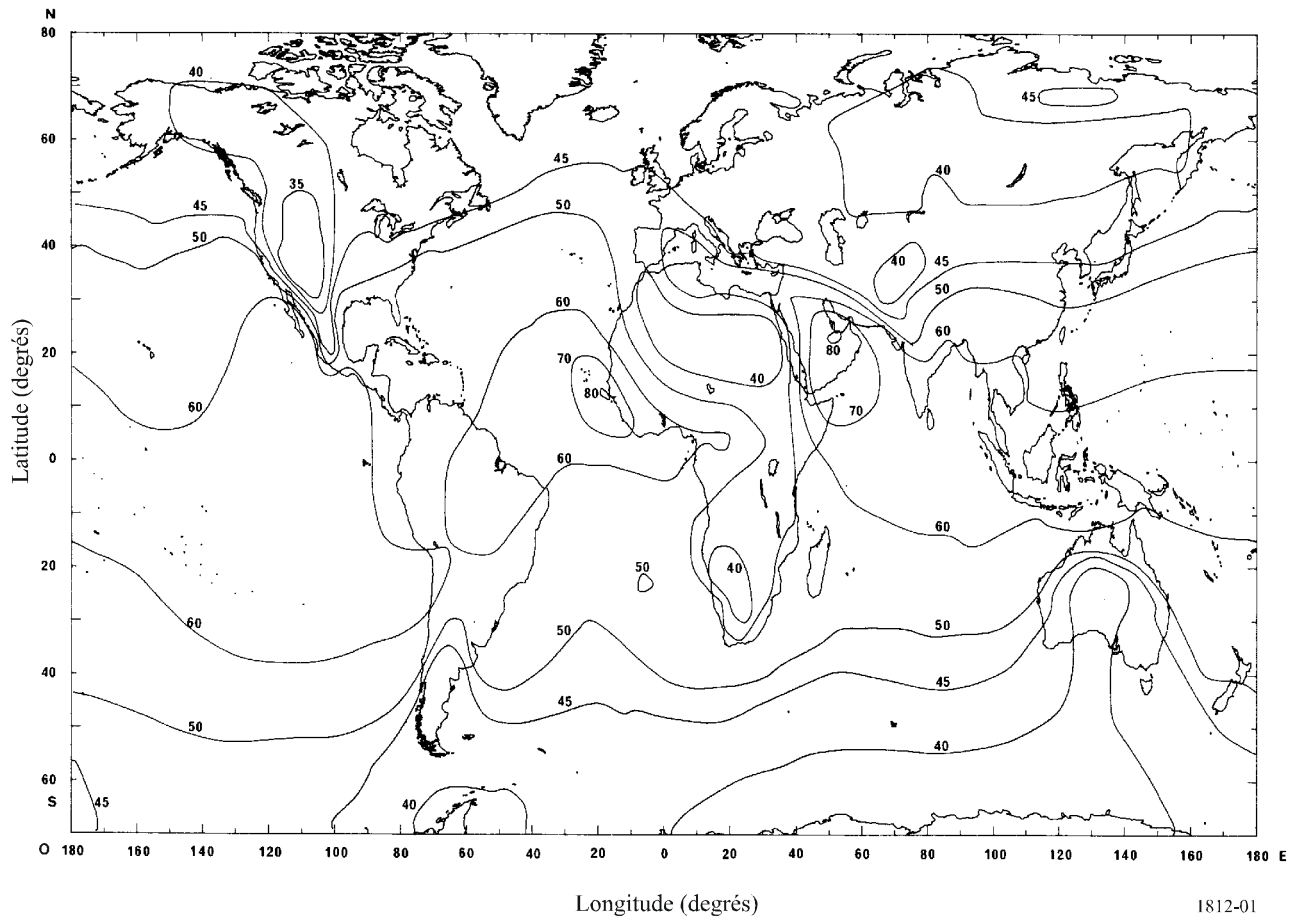
- L_b : affaiblissement de transmission de référence non dépassé pendant $p\%$ du temps et pour $p_L\%$ d'emplacements calculé au moyen de l'équation (61)
- f : fréquence requise (GHz).

Appendice 1 à l'Annexe 1

Données radiométéorologiques requises pour la procédure de prévision

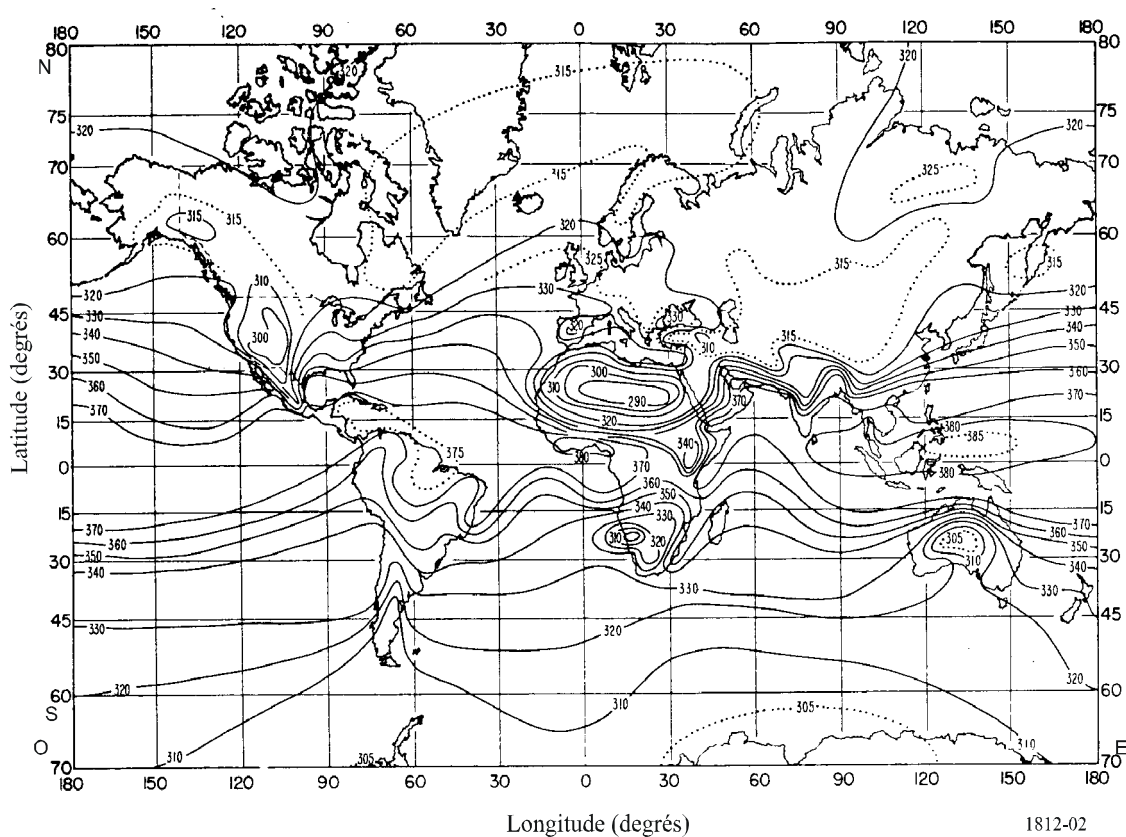
Les valeurs annuelles moyennes de ΔN comme valeurs positives en unités N/km sont représentées sur la Fig. 1.

FIGURE 1

Valeurs moyennes annuelles de ΔN , unités N/km

Les valeurs annuelles moyennes du coïndice de réfraction au niveau de la mer, N_0 , en unités N sont représentées sur la Fig. 2. Le paramètre N_0 est utilisé uniquement dans la partie relative à la diffusion troposphérique de la méthode globale.

FIGURE 2

Coïndice au niveau de la mer, N_0 , unités N

Appendice 2 à l'Annexe 1

Analyse du profil du trajet

1 Introduction

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

2 Etablissement du profil du trajet

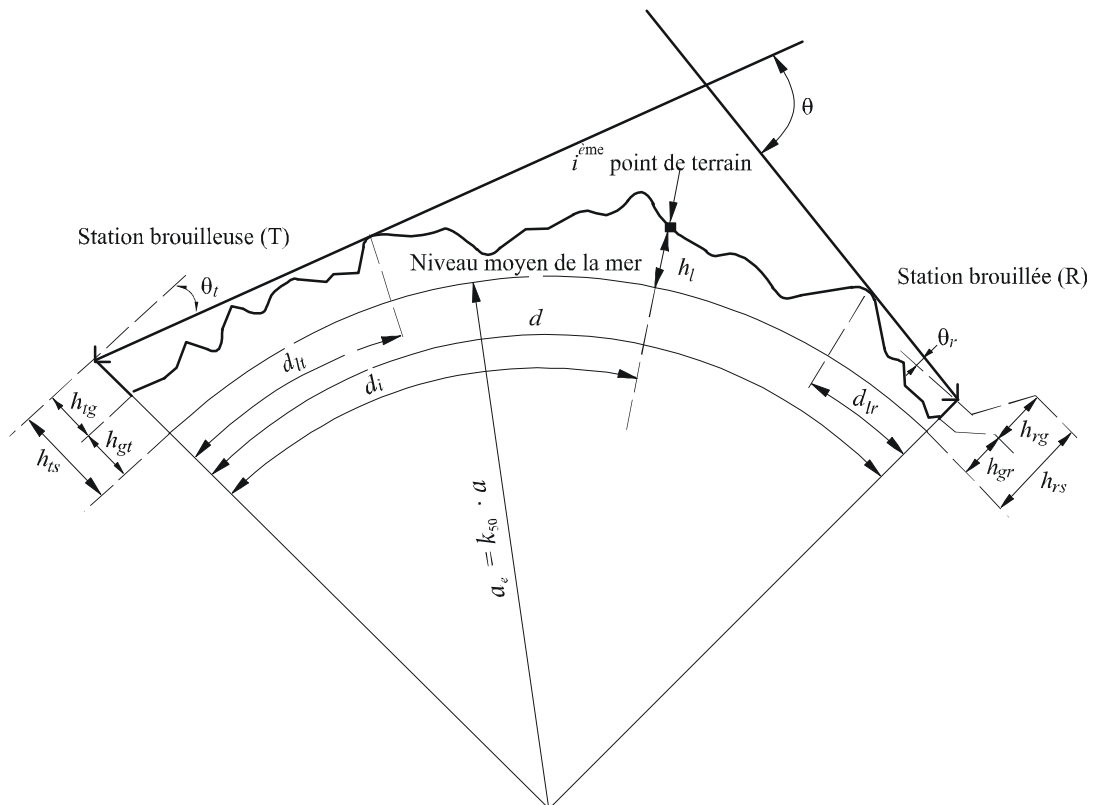
Sur la base des coordonnées géographiques de la station d'émission (ϕ_e, ψ_e) et de la station de réception (ϕ_r, ψ_r), il convient de calculer les hauteurs du terrain (au-dessus du niveau moyen de la mer) sur le trajet le long du grand cercle à l'aide d'une base de données topographiques ou de cartes de contours à grande échelle appropriées. La résolution en distance du profil devrait, dans la mesure du possible, être suffisante pour saisir les caractéristiques importantes du terrain. En règle générale, un incrément de distance compris entre 30 m et 1 km est approprié et, dans la plupart des cas, il convient d'utiliser des incréments de distance plus importants pour des trajets plus longs. Le profil

du trajet doit avoir pour point de départ la hauteur du niveau du sol à l'emplacement de la station d'émission et pour point d'arrivée la hauteur du niveau du sol à l'emplacement de la station de réception. Dans les équations ci-après, la courbure de la Terre est prise en considération, si nécessaire, sur la base de la valeur a_e donnée dans l'équation (7a).

Il est préférable d'utiliser des points de profil espacés à intervalles réguliers, mais il est possible d'utiliser cette 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 présente Recommandation a été élaborée à partir d'essais fondés sur des points de profil espacés régulièrement; on ne dispose d'aucune information quant à l'incidence sur la précision de points espacés irrégulièrement.

Aux fins de la présente Recommandation, on appelle point 1 le point du profil correspondant à la station d'émission et point n le point correspondant à la station de réception. Le profil du trajet se compose donc de n points. On trouvera sur la Fig. 3 un exemple d'un profil de trajet avec des hauteurs de terrain au-dessus du niveau moyen de la mer qui présente les divers paramètres rapportés à la configuration effective du terrain.

FIGURE 3
Exemple d'un profil de trajet (transhorizon)



Note 1 – La valeur θ , ainsi représentée est négative.

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

TABLEAU 7
Définition des paramètres du profil du trajet

Paramètre	Description
a_e	Rayon terrestre équivalent (km)
d	Longueur du trajet le long du grand cercle (km)
d_{ii}	Incrément de distance utilisé pour un profil de trajet régulier (points espacés à intervalles réguliers) (km)
f	Fréquence (GHz)
λ	Longueur d'onde (m)
h_{ts}	Hauteur a-dnm de l'antenne de la station d'émission (m)
h_{rs}	Hauteur de l'antenne de la station de réception (m) a-dnm
θ_t	Pour un trajet transhorizon: angle d'élévation de l'horizon par rapport à l'horizontale locale (mrad), mesuré à partir de l'antenne de la station d'émission. Pour un trajet en visibilité directe, ce paramètre doit être l'angle d'élévation de l'antenne de la station de réception
θ_r	Pour un trajet transhorizon: angle d'élévation de l'horizon par rapport à l'horizontale locale (mrad), mesuré à partir de l'antenne de la station de réception. Pour un trajet en visibilité directe, ce paramètre doit être l'angle d'élévation de l'antenne de la station d'émission
θ	Distance angulaire du trajet (mrad)
h_{st}	Hauteur a-dnm de la Terre régulière à l'emplacement de la station d'émission (m)
h_{sr}	Hauteur a-dnm de la Terre régulière à l'emplacement de la station de réception (m)
h_i	Hauteur a-dnm du i -ème point du terrain (m) h_1 : altitude du sol à la station d'émission h_n : altitude du sol à la station de réception
h_m	Irrégularité du terrain (m)
h_{te}	Hauteur équivalente de l'antenne de la station d'émission (m)
h_{re}	Hauteur équivalente de l'antenne de la station de réception (m)

3 Longueur du trajet

Il est possible d'obtenir la longueur du trajet en utilisant la géométrie du grand cercle à partir des coordonnées géographiques des stations d'émission (φ_t, ψ_t) et de réception (φ_r, ψ_r). Une autre possibilité consiste à déterminer cette longueur, à partir du profil du trajet. En effet, la longueur du trajet, d (km), peut être déduite des données du profil du trajet suivantes:

$$d = d_n \quad \text{km} \quad (63)$$

Pour des points du profil du trajet espacés à intervalles réguliers, il est également vrai que:

$$d_i = (i-1) \cdot d_{ii} \quad \text{km} \quad (64)$$

où $i = 1, \dots, n$, lorsque d_{ii} est l'incrément de distance du trajet (km).

4 Classification des trajets

Il faut utiliser le profil du trajet pour déterminer si le trajet est en visibilité directe ou transhorizon en se fondant sur la valeur médiane du rayon terrestre équivalent, a_e , telle qu'elle est donnée par l'équation (7a).

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

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

$$\theta_{max} > \theta_{td} \quad \text{mrad} \quad (65)$$

où:

$$\theta_{max} = \max_{i=2}^{n-1} (\theta_i) \quad \text{mrad} \quad (66)$$

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

$$\theta_i = \frac{h_i - h_{ts}}{d_i} - \frac{10^3 d_i}{2 a_e} \quad \text{mrad} \quad (67)$$

où:

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

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

d_i : distance de la station d'émission au i -ème point du terrain (km)

$$\theta_{td} = \frac{h_{rs} - h_{ts}}{d} - \frac{10^3 d}{2 a_e} \quad \text{mrad} \quad (68)$$

où:

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

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

a_e : valeur médiane du rayon terrestre équivalent, appropriée pour le trajet (équation (7a)).

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

5.1 Tout type de trajet

Les paramètres qui doivent être calculés à partir du profil du trajet sont ceux qui figurent dans le Tableau 7.

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

L'angle d'élévation de l'horizon de l'antenne de la station d'émission est l'angle maximal d'élévation de l'horizon de l'antenne lorsque l'équation (66) est appliquée à $n - 2$ hauteurs de profil de terrain.

$$\theta_t = \max(\theta_{max}, \theta_{td}) \quad \text{mrad} \quad (69)$$

θ_{max} étant déterminé dans l'équation (66).

5.1.2 Distance de l'horizon par rapport à l'antenne de la station d'émission, d_{lt}

La distance de l'horizon par rapport à l'antenne de la station d'émission est la distance minimale depuis l'émetteur à laquelle est calculé l'angle maximal d'élévation de l'horizon de l'antenne à l'aide de l'équation (66).

$$d_{lt} = d_i \quad \text{km} \quad \text{pour max } (\theta_i) \quad (70)$$

Si aucun horizon n'est détecté, la valeur $d_{lt} = d_{im50}$ (voir le § 4.3.1).

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

Si aucun horizon n'est détecté ($\theta_t = \theta_{td}$), appliquer la formule suivante:

$$\theta_r = \frac{h_{ts} - h_{rs}}{d} - 10^3 \frac{d}{2a_e} \quad \text{mrad} \quad (71)$$

Toutefois, si un horizon est détecté pour la station d'émission, l'angle d'élévation de l'horizon de l'antenne de la station de réception est l'angle maximal d'élévation de l'horizon de l'antenne, lorsque l'équation (66) est appliquée à $n - 2$ hauteurs de profil de terrain.

$$\theta_r = \max_{j=2}^{n-1} (\theta_j) \quad \text{mrad} \quad (72)$$

$$\theta_j = \frac{h_j - h_{rs}}{d - d_j} - \frac{10^3 (d - d_j)}{2a_e} \quad \text{mrad} \quad (72a)$$

5.1.4 Distance de l'horizon par rapport à l'antenne de la station de réception, d_{lr}

La distance de l'horizon par rapport à l'antenne de la station de réception est la distance minimale depuis le récepteur à laquelle est calculé l'angle maximal d'élévation de l'horizon de l'antenne, à l'aide de l'équation (64).

$$d_{lr} = d - d_j \quad \text{km} \quad \text{pour max } (\theta_j) \quad (73)$$

Si aucun horizon n'est détecté, la valeur $d_{lr} = d - d_{im50}$ (voir le § 4.3.1).

5.1.5 Distance angulaire θ (mrad)

$$\theta = \frac{10^3 d}{a_e} + \theta_t + \theta_r \quad \text{mrad} \quad (74)$$

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

5.1.6.1 Considérations générales

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

5.1.6.2 Exceptions

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

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

5.1.6.3 Calcul de la surface de la Terre régulière

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

$$h_{si} = h_{st} + m \cdot d_i \quad \text{m} \quad (75)$$

où:

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

Deux méthodes sont disponibles pour les deux étapes suivantes du calcul. Les équations (76a) et (77a) peuvent être utilisées si les points du profil sont espacés à intervalles réguliers. Les équations (76b) et (77b), qui sont plus complexes, doivent être utilisées si les points du profil sont espacés irrégulièrement et peuvent être utilisées dans les deux cas.

Pour les profils de points espacés à intervalles réguliers:

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n (h_i - h_a) \left(d_i - \frac{d}{2} \right)}{\sum_{i=1}^n \left(d_i - \frac{d}{2} \right)^2} \quad \text{m/km} \quad (76a)$$

Pour tout autre profil:

$$m = \left(\frac{1}{d^3} \right) \sum_{i=2}^n 3 (d_i - d_{i-1}) (d_i + d_{i-1} - d) (h_i + h_{i-1} - 2h_a) + (d_i - d_{i-1})^2 (h_i - h_{i-1}) \quad \text{m/km} \quad (76b)$$

où:

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

Pour les profils de points espacés à intervalles réguliers:

$$h_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i \quad \text{m} \quad (77a)$$

Pour tout autre profil, une moyenne pondérée est calculée:

$$h_a = \left(\frac{1}{2d} \right) \sum_{i=2}^n (d_i - d_{i-1}) (h_i + h_{i-1}) \quad \text{m} \quad (77b)$$

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

$$h_{st} = h_a - m \frac{d}{2} \quad \text{m} \quad (78)$$

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

$$h_{sr} = h_{st} + m \cdot d \quad \text{m} \quad (79)$$

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

$$h_{st} = \min (h_{st}, h_1) \quad \text{m} \quad (80a)$$

$$h_{sr} = \min (h_{sr}, h_n) \quad \text{m} \quad (80b)$$

Si l'une de ces deux hauteurs, h_{st} ou h_{sr} ou les deux, ont dû être corrigées à l'aide des équations (80a) ou (80b), il faut également corriger la valeur de la pente, m , de la surface de la Terre régulière par la formule:

$$m = \frac{h_{sr} - h_{st}}{d} \quad \text{m/km} \quad (81)$$

Les hauteurs effectives du terminal, h_{te} et h_{re} , sont données par:

$$h_{te} = h_{tg} + h_1 - h_{st} \quad \text{m} \quad (82)$$

$$h_{re} = h_{rg} + h_n - h_{sr} \quad \text{m}$$

5.1.6.4 Irrégularité du terrain, h_m

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

$$h_m = \max_{i=i_t}^{i_r} [h_i - (h_{st} + m \cdot d_i)] \quad \text{m} \quad (83)$$

où:

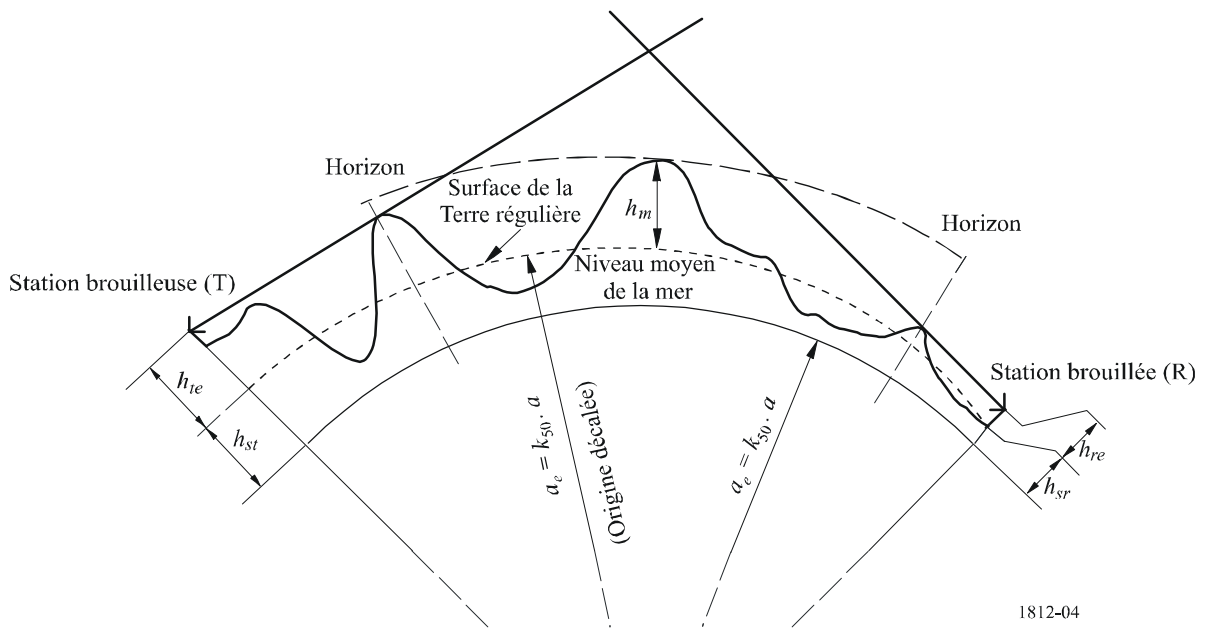
i_{lt} : indice du point du profil à une distance d_{lt} de l'émetteur

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. 4.

FIGURE 4

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



Appendice 3 à l'Annexe 1

Approximation de la fonction de distribution normale cumulative complémentaire inverse

L'approximation donnée ci-après de la fonction de distribution normale cumulative complémentaire inverse est valable pour $0,000001 \leq x \leq 0,999999$, avec une erreur maximale de 0,00054. Si $x < 0,000001$, ce qui suppose que $\beta_0 < 0,0001\%$, la valeur de x doit être 0,000001. Le même raisonnement vaut pour $x > 0,999999$. Cette approximation peut être utilisée en toute confiance pour la fonction d'interpolation dans les équations (30b) et (49) ainsi que dans l'équation (61). Toutefois, dans le cas de cette dernière équation, la valeur de x doit être limitée à: $0,01 \leq x \leq 0,99$.

La fonction $I(x)$ est donnée par:

$$I(x) = T(x) - \xi(x) \quad \text{pour } 0,000001 \leq x \leq 0,5 \quad (84a)$$

et, par symétrie:

$$I(x) = \xi(1-x) - T(1-x) \quad \text{pour } 0,5 < x \leq 0,999999 \quad (84b)$$

où:

$$T(x) = \sqrt{[-2 \ln(x)]} \quad (85a)$$

$$\xi(x) = \frac{[(C_2 \cdot T(x) + C_1) \cdot T(x)] + C_0}{[(D_3 \cdot T(x) + D_2) T(x) + D_1] T(x) + 1} \quad (85b)$$

$$C_0 = 2,515516698 \quad (85c)$$

$$C_1 = 0,802853 \quad (85d)$$

$$C_2 = 0,010328 \quad (85e)$$

$$D_1 = 1,432788 \quad (85f)$$

$$D_2 = 0,189269 \quad (85g)$$

$$D_3 = 0,001308 \quad (85h)$$
