

UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

Recommandation UIT-R P.1812-6
(09/2021)

**Méthode de prévision de la propagation
fondée sur le trajet pour les services de
Terre point à zone dans la gamme de
fréquences comprises entre
30 MHz et 6 000 MHz**

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

Séries des Recommandations UIT-R

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

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

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

Publication électronique
Genève, 2022

© UIT 2022

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.1812-6*

Méthode de prévision de la propagation fondée sur le trajet pour les services de Terre point à zone dans la gamme de fréquences comprises entre 30 MHz et 6 000 MHz

(Question UIT-R 203/3)

(2007-2009-2012-2013-2015-2019-2021)

Domaine 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 comprises entre 30 MHz et 6 000 MHz. Cette méthode de prévoir les niveaux du signal, à la valeur médiane de la distribution de la propagation par trajets multiples, 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.

Mots clés

Trajet longue distance-propagation spécifique, trajets/circuits troposphériques, prévisions de l'affaiblissement de transmission de référence, variabilité temporelle et variabilité en fonction de l'emplacement.

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 de référence point à zone pour le service mobile aéronautique entre 125 MHz et 15,5 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 0,1 GHz environ;

* La Commission d'études 3 des radiocommunications a apporté des modifications rédactionnelles à cette Recommandation en 2022 conformément aux dispositions de la Résolution UIT-R 1.

- c) que la Recommandation UIT-R P.617 fournit des indications sur la prévision de l'affaiblissement de propagation 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 de propagation 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;
- g) que la Recommandation UIT-R P.2001 présente un modèle de large portée pour la propagation sur des trajets de Terre dans la gamme des fréquences comprises entre 30 MHz et 50 GHz, y compris les statistiques relatives aux évanouissements et aux renforcements, qui est particulièrement adapté pour les simulations de Monte-Carlo;
- h) que la Recommandation UIT-R P.2040 fournit des indications sur les effets des matériaux de construction et des structures sur la propagation des ondes radioélectriques,

recommande

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.

NOTE – Des trajets de propagation longue distance sont également possibles dans la bande d'ondes métriques via l'ionosphère. Les modes concernés sont présentés de manière succincte dans la Recommandation UIT-R P.844.

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 la gamme de fréquences comprises entre 30 MHz et 6 000 MHz. 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. Le paramètre variabilité en fonction des emplacements est ensuite caractérisé statistiquement par rapport à l'emplacement de chaque récepteur, en plus du paramètre affaiblissement dû à la pénétration dans les bâtiments, défini dans la Recommandation P.2040. 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, le paramètre variabilité en fonction des emplacements, défini dans la présente Recommandation, et le paramètre affaiblissement dû à la pénétration dans les bâtiments, défini dans la Recommandation UIT-R P.2040, 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 l'utilisation des valeurs médianes de l'affaiblissement peut prêter à confusion si l'émetteur ne se trouve pas dans un emplacement «médian».

2 Éléments 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 (LoS)*;
- *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);
- *variabilité en fonction des emplacements*;
- *affaiblissements dus à la pénétration dans des bâtiments* (voir la Recommandation UIT-R P.2040).

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	6,0	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
Polarisation				Polarisation du signal, par exemple verticale ou horizontale
w_s	m	1	100	Largeur de la rue. Il convient d'utiliser la valeur 27, sauf si des valeurs locales spécifiques sont disponibles.

La polarisation dont il est question dans le Tableau 1 n'est pas un paramètre à valeur numérique. Les informations sont utilisées dans le § 4.3.3 en lien avec les formules (29a), (29b) et (30).

3.2 Profil du trajet radioélectrique

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

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

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

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

$$d_i: \text{distance du } i\text{-ème point du profil depuis l'émetteur (km)} \quad (1a)$$

$$h_i: \text{hauteur du terrain du } i\text{-ème point du profil au-dessus du niveau de la mer (m)} \quad (1b)$$

$$g_i = \begin{cases} h_i + \text{hauteur représentative du groupe d'obstacles pour le } i\text{-ème point du profil (m)} & \text{pour } i = 2, \dots, n - 1 \\ h_1 & \text{pour } i = 1 \\ h_n & \text{pour } i = n \end{cases} \quad (1c)$$

où:

- i : 1, 2, 3, ..., n = indice du point du profil
 n : nombre de points du profil.

Il doit y avoir au moins un point du profil intermédiaire entre l'émetteur et le récepteur. Pour ce faire, il faut que $n \geq 3$. Un petit nombre de points convient uniquement pour des trajets courts de moins de 1 km.

Il est à noter que le premier point du profil se situe à l'emplacement de l'émetteur. Par conséquent, d_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.

Aucune distance précise entre les points du profil n'est donnée. Si l'on prend comme hypothèse que les profils sont extraits d'ensembles de données d'élévation du terrain et de couverture au sol (obstacles) numériques, l'espacement approprié entre les points sera, en règle générale, analogue à l'espacement entre les points dans les ensembles de données source de résolution similaire les uns aux autres. Il n'est pas nécessaire que les points du profil soient équidistants les uns des autres mais il est souhaitable que l'espacement soit plus ou moins le même pour l'ensemble du profil et non inférieur à l'ordre de 30 m.

Les réseaux utilisés pour les calculs comprennent les distances, d_i , les hauteurs du terrain, h_i , telles que données par l'équation (1b) et les hauteurs du terrain avec les hauteurs représentatives des obstacles ajoutées, g_i , telles que données par l'équation (1c). La hauteur représentative des obstacles ne doit pas être ajoutée aux hauteurs du terrain à l'émetteur et au récepteur. Ainsi, g_1 est la hauteur du terrain à l'émetteur en mètres au-dessus du niveau de la mer et g_n est la hauteur du terrain au récepteur en mètres au-dessus du niveau de la mer.

La «hauteur représentative du groupe d'obstacles» utilisée dans l'équation (1c) se rapporte à des informations statistiques relatives à la hauteur associées à la classification de la couverture au sol, par exemple végétation ou bâtiments, c'est-à-dire une valeur unique de la hauteur attribuée à chaque classe de végétation/d'obstacle. On ajoute des hauteurs représentatives d'obstacles à un profil car on part du principe que les hauteurs h_i correspondent à la surface nue de la Terre. Si le trajet radioélectrique traverse une zone boisée ou urbanisée ou il y a diffraction ou obstruction sur le sous-trajet, la hauteur effective du profil sera en général plus élevée car le signal radioélectrique se propagera au-dessus de l'obstacle. On peut donc obtenir une représentation plus adéquate du profil en ajoutant des hauteurs représentatives afin de tenir compte des obstacles.

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

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

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

Ainsi, la hauteur représentative du groupe d'obstacles R , dépend non seulement de la hauteur physique type des obstacles mais aussi de l'espacement dans le plan horizontal entre les objets et des vides entre ces objets. Il n'y a pas de norme acceptée permettant de dire ce qu'une catégorie d'obstacles, par exemple la catégorie «urbaine», représente en termes physiques dans différents pays. Lorsqu'elles sont disponibles, il conviendrait d'utiliser les informations relatives à la hauteur représentative des obstacles locaux basées sur des statistiques ou provenant d'autres sources; le Tableau 2 donne des valeurs par défaut des hauteurs représentatives des obstacles qui peuvent être utilisées si l'on ne dispose pas d'informations plus précises pour la région, le pays concerné(e).

TABLEAU 2

Valeurs par défaut de la hauteur représentative des obstacles

Catégorie d'obstacles	Hauteur représentative des obstacles (m)
	Ajouter au profil de l'équation 1(c) pour $i = 2$ à $n - 1$
Eau/mer	0
Zone dégagée/rurale	0
Zone suburbaine	10
Zone urbaine/boisée/forêt	15
Zone urbaine dense	20

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.

À titre de référence, l'administration peut utiliser les contours côtiers tels qu'ils figurent sur la Carte mondiale numérisée de l'UIT (IDWM, *ITU Digitized World Map*), qui est disponible auprès du Bureau des radiocommunications (BR): <https://www.itu.int/pub/R-SOFT-IDWM>. 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.

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.

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)

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.

Si des mesures locales ne sont pas disponibles, ces grandeurs peuvent être déterminées à partir des cartes figurant dans les produits numériques faisant partie intégrante de la présente Recommandation. Les cartes figurent dans les fichiers DN50.txt et N050.txt, respectivement. Les données vont de 0° à 360° en longitude et de +90° à -90° en latitude, avec une résolution de 1,5° 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.

TABLEAU 4

Produits numériques faisant partie intégrante de la présente Recommandation

Nom du fichier	Source	Latitude			Longitude		
		De (deg)	A (deg)	Espace-ment (deg)	De (deg)	A (deg)	Espace-ment (deg)
DN50.txt	P.453	90	-90	1,5	0	360	1,5
N050.txt	P.453	90	-90	1,5	0	360	1,5
LAT.txt	P.453	90	-90	1,5	0	360	1,5
LON.txt	P.453	90	-90	1,5	0	360	1,5

Ces cartes numériques ont été obtenues à partir de l'analyse d'un ensemble de données recueillies dans le monde entier sur dix ans (1983-1992) par radiosondage.

Les cartes numériques figurent dans le fichier au format "zip" [R-REC-P.1812-6-202109-I!!ZIP-E.zip](#).

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:

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

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

et

$$\tau = 1 - \exp(-0,000412d_{lm}^{2,41}) \quad (3)$$

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

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

Les zones radioclimatiques à prendre en considération pour déterminer d_{lm} et d_{lm} sont définies dans le Tableau 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_{lm} 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 carte numérique faisant partie intégrante de la Recommandation qui figure dans le fichier DN50.txt, 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:

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

où $a = 6\,371$ km désigne le rayon terrestre physique moyen.

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

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

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

On définit une valeur générale du rayon équivalent de la Terre, où $a_p = a_e$ pendant 50% du temps et où $a_p = a_\beta$ pendant $\beta_0\%$ 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 5) 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 la Pièce jointe 1 à la présente Annexe.

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 LoS, 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 § 4.7-4.8. Enfin, on trouvera au § 4.10 des expressions qui mettent

en corrélation l'affaiblissement de transmission de référence et le champ (dB μ V/m) pour une puissance apparente rayonnée de 1 kW.

TABLEAU 5

Valeur des paramètres obtenus à l'issue de l'analyse du profil du trajet

Paramètre	Description
d	Longueur du trajet le long du grand cercle (km)
d_{lt}, d_{lr}	Distance entre les antennes de la station d'émission et de la station de réception et leurs horizons respectifs (km)
θ_i, 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}	Respectivement pour h_{ts} et h_{rs}
h_{te}, h_{re}	Hauteurs équivalentes des antennes au-dessus du terrain (m) pour le modèle de propagation par conduits/réflexion sur des couches tel que défini dans la Pièce jointe 1 de l'Annexe 1
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 (73). Pour les trajets en totalité terrestres: $\omega = 0$

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 LoS que pour des trajets transhorizons.

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

$$L_{bfs} = 92,4 + 20 \log f + 20 \log(d_{fs}) \quad \text{dB} \quad (8)$$

où:

f : fréquence (GHz)

d_{fs} : distance entre l'antenne d'émission et l'antenne de réception (km):

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

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

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

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

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:

$$E_{sp} = 2,6 \left[1 - \exp\left(-\frac{d_{lt} + d_{lr}}{10}\right) \right] \log\left(\frac{p}{50}\right) \quad \text{dB} \quad (9a)$$

$$E_{s\beta} = 2,6 \left[1 - \exp\left(-\frac{d_{lt} + d_{lr}}{10}\right) \right] \log\left(\frac{\beta_0}{50}\right) \quad \text{dB} \quad (9b)$$

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 un trajet LoS), 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 un trajet LoS), comme suit:

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

4.3 Propagation par diffraction

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 plat (hauteur nulle) avec des hauteurs d'antenne modifiée 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 parfaitement plat, l'affaiblissement de diffraction final sera le résultat obtenu avec le modèle de Terre sphérique.

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, quelle que soit la nature du terrain, uniforme ou irrégulière et que le trajet soit un trajet LoS ou un trajet transhorizon.

Cette méthode de calcul de l'affaiblissement de diffraction est toujours utilisée pour la valeur médiane du rayon terrestre équivalent. 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 de l'affaiblissement de diffraction une seconde fois pour un facteur multiplicatif du rayon terrestre équivalent égal à 3. Ce second calcul 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 $1\% \leq p \leq 50\%$, est ensuite calculé à l'aide de la procédure de limitation ou d'interpolation décrite au § 4.3.5.

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 $v \leq -0,78$.

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

Le § 4.3.1 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 § 4.3.2 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 (§ 4.3.1).

Le § 4.3.3 décrit comment les méthodes des § 4.3.1 et 4.3.2 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 § 4.3.4 décrit les calculs complets pour un affaiblissement de diffraction non dépassé pendant un pourcentage de temps p% donné.

4.3.1 Partie de Bullington du calcul de la diffraction

Dans les équations 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 g_i en mètres au-dessus du niveau de la mer; i prend des valeurs comprises entre 1 et n où n 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 $1/a_p$, ou a_p est le rayon terrestre équivalent en kilomètres. La longueur d'onde en mètres est représentée par λ . Les valeurs à utiliser pour a_p sont définies dans le § 4.3.5.

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

$$S_{im} = \max \left[\frac{g_i + 500C_e d_i (d - d_i) - h_{tc}}{d_i} \right] \quad \text{m/km} \quad (13)$$

où l'indice du profil i prend des valeurs allant de 2 à $n - 1$.

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

$$S_{tr} = \frac{h_{rc} - h_{tc}}{d} \quad \text{m/km} \quad (14)$$

Deux cas doivent maintenant être examinés.

Cas 1: le trajet de diffraction est un trajet en visibilité directe

Si $S_{im} < S_{tr}$ le trajet de diffraction est un trajet en visibilité directe.

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

$$v_{\max} = \max \left\{ \left[g_i + 500C_e d_i (d - d_i) - \frac{h_{tc}(d - d_i) + h_{rc} d_i}{d} \right] \sqrt{\frac{0,002d}{\lambda d_i (d - d_i)}} \right\} \quad (15)$$

où l'indice du profil i prend des valeurs allant de 2 à $n - 1$.

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

$$L_{uc} = J(v_{\max}) \quad \text{dB} \quad (16)$$

où la fonction J est donnée par l'équation (12) pour v_b supérieur à $-0,78$ et est nulle dans les autres cas.

Cas 2: le trajet de diffraction est un trajet transhorizon

Si $S_{im} \geq S_{tr}$, le trajet de diffraction est un trajet transhorizon.

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

$$S_{rim} = \max \left[\frac{g_i + 500C_e d_i (d - d_i) - h_{rc}}{d - d_i} \right] \quad \text{m/km} \quad (17)$$

où l'indice du profil i prend des valeurs allant de 2 à $n - 1$.

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

$$d_{bp} = \frac{h_{rc} - h_{tc} + S_{rim} d}{S_{tim} + S_{rim}} \quad \text{km} \quad (18)$$

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

$$v_b = \left[h_{tc} + S_{tim} d_{bp} - \frac{h_{tc} (d - d_{bp}) + h_{rc} d_{bp}}{d} \right] \sqrt{\frac{0,002d}{\lambda d_{bp} (d - d_{bp})}} \quad (19)$$

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

$$L_{uc} = J(v_b) \quad \text{dB} \quad (20)$$

Pour L_{uc} calculé à l'aide de l'équation (16) ou (20), l'affaiblissement de diffraction au point de Bullington pour le trajet est maintenant donné par l'équation:

$$L_{bull} = L_{uc} + \left[1 - \exp\left(\frac{-L_{uc}}{6}\right) \right] (10 + 0,02d) \quad \text{dB} \quad (21)$$

4.3.2 Affaiblissement de diffraction pour une Terre sphérique

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

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

$$d_{los} = \sqrt{2a_p} \left(\sqrt{0,001h_{tesph}} + \sqrt{0,001h_{resph}} \right) \quad \text{km} \quad (22)$$

Les valeurs à utiliser pour a_p sont indiquées dans le § 4.3.5. Les hauteurs effectives d'antennes h_{tesph} et h_{resph} sont définies dans les équations (38a) et (38b).

Si $d \geq d_{los}$ Calculer l'affaiblissement de diffraction selon la méthode du § 4.3.3 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 l'équation suivante:

$$h_{se} = \frac{\left(h_{tesph} - 500 \frac{d_{se1}^2}{a_p} \right) d_{se2} + \left(h_{resph} - 500 \frac{d_{se2}^2}{a_p} \right) d_{se1}}{d} \quad \text{m} \quad (23)$$

où:

$$d_{se1} = \frac{d}{2} (1 + b) \quad \text{km} \quad (24a)$$

$$d_{se2} = d - d_{se1} \quad \text{km} \quad (24b)$$

$$b = 2\sqrt{\frac{m_c + 1}{3m_c}} \cos \left\{ \frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \arccos \left(\frac{3c}{2} \sqrt{\frac{3m_c}{(m_c + 1)^3}} \right) \right\} \quad (24c)$$

Où la fonction arccos donne un angle en radians.

$$c = \frac{h_{tesph} - h_{resph}}{h_{tesph} + h_{resph}} \quad (24d)$$

$$m_c = \frac{250d^2}{a_p (h_{tesph} + h_{resph})} \quad (24e)$$

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

$$h_{req} = 17,456 \sqrt{\frac{d_{se1} d_{se2} \lambda}{d}} \quad \text{m} \quad (25)$$

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

$$a_{em} = 500 \left(\frac{d}{\sqrt{h_{tesph}} + \sqrt{h_{resph}}} \right)^2 \quad \text{km} \quad (26)$$

Utiliser la méthode décrite au § 4.3.3 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:

$$L_{dsph} = \left[1 - \frac{h_{se}}{h_{req}} \right] L_{dft} \quad \text{dB} \quad (27)$$

4.3.3 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. Elle intègre à la méthode de calcul de la diffraction globale décrite au § 4.3.2 ci-dessus pour donner 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 § 4.3.2.

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 équations (29) à (36). 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 équations (29) à (36). Le résultat obtenu est L_{dftsea} .

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

$$L_{dft} = \omega L_{dftsea} + (1 - \omega) L_{dftland} \quad \text{dB} \quad (28)$$

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

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

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

$$K_H = 0,036 (a_{dft} f)^{-1/3} \left[(\epsilon_r - 1)^2 + \left(\frac{18\sigma}{f} \right)^2 \right]^{-1/4} \quad \text{(horizontale)} \quad (29a)$$

et

$$K_V = K_H \left[\epsilon_r^2 + \left(\frac{18\sigma}{f} \right)^2 \right]^{1/2} \quad \text{(verticale)} \quad (29b)$$

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 horizontales et verticales, calculer chacune des composantes séparément et combiner les résultats en calculant une somme vectorielle du champ. Dans la pratique, cette décomposition sera généralement inutile, car au-delà de 300 MHz, on peut utiliser une valeur de 1 pour β_{dft} dans la formule (30).

Calculer le paramètre sol terrestre/polarisation:

$$\beta_{dft} = \frac{1 + 1,6K^2 + 0,67K^4}{1 + 4,5K^2 + 1,53K^4} \quad (30)$$

où K est K_H ou K_V selon la polarisation.

Distance normalisée:

$$X = 21,88 \beta_{dft} \left(\frac{f}{a_{dft}^2} \right)^{1/3} d \quad (31)$$

Hauteurs normalisées de l'émetteur et du récepteur:

$$Y_t = 0,9575 \beta_{dft} \left(\frac{f^2}{a_{dft}} \right)^{1/3} h_{tesph} \quad (32a)$$

$$Y_r = 0,9575 \beta_{dft} \left(\frac{f^2}{a_{dft}} \right)^{1/3} h_{resph} \quad (32b)$$

Calculer le terme de distance donné par:

$$F_X = \begin{cases} 11 + 10 \log(X) - 17,6X & \text{pour } X \geq 1,6 \\ -20 \log(X) - 5,6488 X^{1,425} & \text{pour } X < 1,6 \end{cases} \quad (33)$$

Définir une fonction de hauteur normalisée donnée par:

$$G(Y) = \begin{cases} 17,6(B-1,1)^{0,5} - 5\log(B-1,1) - 8 & \text{pour } B > 2 \\ 20\log(B+0,1B^3) & \text{sinon} \end{cases} \quad (34)$$

où:

$$B = \beta_{dft} Y \quad (35)$$

Limiter $G(Y)$ pour que $G(Y) \geq 2 + 20\log K$.

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

$$L_{dft} = -F_X - G(Y_t) - G(Y_r) \quad \text{dB} \quad (36)$$

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

Utiliser la méthode décrite au § 4.3.1 pour obtenir les hauteurs du profil du trajet (g_i) et les hauteurs d'antenne (h_{tc} , h_{rc}). Prendre l'affaiblissement de diffraction au point de Bullington résultant pour le trajet effectif, L_{bulla} égal à L_{bull} donné par l'équation (21).

La Pièce jointe 3 décrit une autre méthode pour calculer L_{bulls} sans utiliser l'analyse du profil de terrain.

Utiliser la méthode décrite au § 4.3.1 une seconde fois, avec toutes les hauteurs du profil, g_i , mises à zéro et les hauteurs d'antenne modifiées données par:

$$h'_{tc} = h_{tc} - h_{std} \quad \text{m} \quad (37a)$$

$$h'_{rc} = h_{rc} - h_{srd} \quad \text{m} \quad (37b)$$

où les hauteurs, pour une Terre régulière, de l'émetteur et du récepteur, h_{std} et h_{srd} , sont données au § 5.6.2 de la Pièce jointe 1 de cette Annexe. Prendre l'affaiblissement de diffraction au point de Bullington résultant, pour ce trajet régulier, L_{bulls} égal à L_{bull} donné par l'équation (21).

Utiliser la méthode décrite au § 4.3.2 pour calculer l'affaiblissement de diffraction pour une Terre sphérique L_{dsph} pour la longueur du trajet effectif d km et avec:

$$h_{tesph} = h'_{tc} \quad \text{m} \quad (38a)$$

$$h_{resph} = h'_{rc} \quad \text{m} \quad (38b)$$

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

$$L_d = L_{bulla} + \max\{L_{dsph} - L_{bulls}, 0\} \quad \text{dB} \quad (39)$$

4.3.5 Affaiblissement de diffraction non dépassé pendant $p\%$ du temps

Utiliser la méthode décrite au § 4.3.4 pour calculer l'affaiblissement de diffraction L_d pour la valeur médiane du rayon terrestre équivalent $a_p = a_e$ donnée par l'équation (7a). L'affaiblissement de diffraction médian L_{d50} est pris égal à L_d .

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

Si $p < 50\%$, l'affaiblissement de diffraction non dépassé pendant $p\%$ du temps, L_{dp} , devrait être calculé comme suit.

Utiliser la méthode décrite au § 4.3.4 pour calculer l'affaiblissement de diffraction L_d pour le rayon terrestre équivalent non dépassé pendant $\beta_0\%$ du temps, $a_p = a_\beta$ donné par l'équation (7b). 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 régie par un facteur d'interpolation, F_i , fondé sur une distribution log-normale de l'affaiblissement dû à la diffraction dans la plage $50\% > p \geq \beta_0\%$, donné par:

$$F_i = \frac{I\left(\frac{p}{100}\right)}{I\left(\frac{\beta_0}{100}\right)} \quad \text{si } 50\% > p > \beta_0\% \quad (40a)$$

$$= 1 \quad \text{si } \beta_0\% \geq p \quad (40b)$$

où $I(x)$ est la distribution normale cumulative complémentaire inverse en fonction de la probabilité x . On trouvera dans la Pièce jointe 2 à 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:

$$L_{dp} = L_{d50} + (L_{d\beta} - L_{d50}) F_i \quad \text{dB} \quad (41)$$

F_i est défini par les équations (40a-b), 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:

$$L_{bd50} = L_{bfs} + L_{d50} \quad \text{dB} \quad (42)$$

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:

$$L_{bd} = L_{b0p} + L_{dp} \quad \text{dB} \quad (43)$$

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:

$$L_{bs} = 190,1 + L_f + 20 \log d + 0,573 \theta - 0,15 N_0 - 10,125 \left[\log \left(\frac{50}{p} \right) \right]^{0,7} \text{ dB} \quad (44)$$

où:

L_f : affaiblissement en fonction de la fréquence:

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

N_0 : indice de réfraction ramené au niveau de la mer, à mi-trajet.

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:

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

où:

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

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

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

$$A_{lf}(f) = \begin{cases} 45,375 - 137,0f + 92,5f^2 & \text{dB pour } f < 0,5 \text{ GHz} \\ 0 & \text{dB pour } f \geq 0,5 \text{ GHz} \end{cases} \quad (47a)$$

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:

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

où:

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

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

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

$$A_{ct,cr} = \begin{cases} -3 \exp(-0,25d_{ct,cr}^2) \{1 + \tanh[0,07(50 - h_{rs,rs})]\} & \text{dB pour } \begin{matrix} \omega \geq 0,75 \\ d_{ct,cr} \leq d_{lt,lr} \\ d_{ct,cr} \leq 5 \text{ km} \end{matrix} \\ 0 & \text{dB dans tous les autres cas} \end{cases} \quad (49)$$

On notera l'ensemble 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, dans le cadre du mécanisme de propagation anormale:

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

où:

γ_d : affaiblissement linéique:

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

θ' : distance angulaire (corrigée, le cas échéant à l'aide de l'équation (48a)), pour permettre l'application du modèle d'effet d'écran du terrain de l'équation (46):

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

où:

ε : 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:

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

et:

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

Les autres termes ont été définis dans les Tableaux 1 et 2 et dans la Pièce jointe 1 à la présente Annexe.

4.6 Affaiblissement de transmission de référence non dépassé pendant $p\%$ du temps et pour 50% des emplacements

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:

$$F_j = 1,0 - 0,5 \left[1,0 + \tanh \left(3,0 \xi \frac{(\theta - \Theta)}{\Theta} \right) \right] \quad (57)$$

où:

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

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:

$$F_k = 1,0 - 0,5 \left[1,0 + \tanh \left(3,0 \kappa \frac{(d - d_{sw})}{d_{sw}} \right) \right] \quad (58)$$

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 LoS et à un phénomène de diffraction sur un sous-trajet passant au-dessus de la mer:

$$L_{minb0p} = \begin{cases} L_{b0p} + (1-\omega)L_{dp} & \text{pour } p < \beta_0 \quad \text{dB} \\ L_{bd50} + (L_{b0\beta} + (1-\omega)L_{dp} - L_{bd50})F_i & \text{pour } p \geq \beta_0 \quad \text{dB} \end{cases} \quad (59)$$

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 (41)
- L_{bd50} : affaiblissement médian de transmission de référence lié à la diffraction, équation (42)
- F_i : facteur d'interpolation de la diffraction pour deux valeurs possibles du rayon terrestre équivalent, donné par l'équation (40).

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

$$L_{minbap} = \eta \ln \left[\exp\left(\frac{L_{ba}}{\eta}\right) + \exp\left(\frac{L_{b0p}}{\eta}\right) \right] \quad \text{dB} \quad (60)$$

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 (46)
- 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:

$$L_{bda} = \begin{cases} L_{bd} & \text{for } L_{minbap} > L_{bd} \\ L_{minbap} + (L_{bd} - L_{minbap})F_k & \text{for } L_{minbap} \leq L_{bd} \end{cases} \quad \text{dB} \quad (61)$$

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 (43)
- 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 (60)

F_k : facteur d'interpolation donné par l'équation (58), 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:

$$L_{bam} = L_{bda} + (L_{minb0p} - L_{bda})F_j \quad \text{dB} \quad (62)$$

où:

- L_{bda} : affaiblissement de transmission de référence théorique associé aux renforcements en cas de propagation par diffraction, de propagation LoS ou de formation de conduits/de réflexion sur les couches, donné par l'équation (61)
- L_{minb0p} : affaiblissement de transmission de référence minimal théorique associé à des conditions de propagation LoS et à un phénomène de diffraction sur un sous-trajet passant au-dessus de la mer, donné par l'équation (59)
- F_j : facteur d'interpolation donné par l'équation (57), 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, L_{bc} (dB), tel qu'il est donné par l'équation suivante:

$$L_{bc} = -5 \log(10^{-0,2L_{bs}} + 10^{-0,2L_{bam}}) \quad \text{dB} \quad (63)$$

où:

- L_{bs} : affaiblissement de transmission de référence dû à la diffusion troposphérique non dépassé pendant $p\%$ du temps, donné par l'équation (44)
- L_{bam} : affaiblissement de transmission de référence modifié, compte tenu des renforcements en cas de propagation par diffraction, de propagation LoS ou de formation de conduits/de réflexion sur les couches, donné par l'équation (62).

4.7 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. Étant 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 moyen local suit approximativement une distribution log-normale.

Les valeurs de l'écart type dépendent de la résolution de la prévision et de la fréquence, et des études empiriques ont fait apparaître un étalement. Les valeurs représentatives, qui correspondent au 50ème centile de la distribution de l'écart type de la variabilité en fonction de l'emplacement, sont données par l'expression suivante:

$$\sigma_L = (0,024f + 0,52)w_a^{0,28} \quad \text{dB} \quad (64)$$

où:

- f : fréquence requise (GHz)
 w_a : résolution de la prévision (m).

La résolution de la prévision est la largeur de la zone carrée sur laquelle la variabilité s'applique. 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%.

Les valeurs indiquées dans le Tableau 6 conviennent pour la planification des services de télévision numérique de Terre (DTT). Elles correspondent au 93ème centile de la fonction de distribution cumulative des mesures pour une antenne à hauteur des toits pour une zone de 100×100 m.

TABLEAU 6

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

	Écart type (dB)		
	100 MHz	600 MHz	2 000 MHz
Radiodiffusion, DTT	5,5	5,5	5,5

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:

$$\begin{aligned}
 u(h) &= 1 && \text{pour } 0 \leq h < R \\
 u(h) &= 1 - \frac{(h-R)}{10} && \text{pour } R \leq h < R+10 \\
 u(h) &= 0 && \text{pour } R+10 \leq h
 \end{aligned} \tag{65}$$

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 (64) ou dans le Tableau 6, par la fonction de la variation de la hauteur, $u(h)$, donnée par l'équation (65), 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%.

4.8 Affaiblissement dû à la pénétration dans les bâtiments

On trouvera dans la Recommandation UIT-R P.2040 des définitions, des modèles théoriques et des références à des résultats empiriques concernant l'affaiblissement dû à la pénétration dans les bâtiments.

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}) (voir la Recommandation UIT-R P.2040). 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.

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_L^2 + \sigma_{be}^2} \quad \text{dB} \tag{66}$$

où σ_L est l'écart type de la variabilité en fonction des emplacements, donné par l'équation (64) ou le Tableau 6.

4.9 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:

$$L_{loc} = 0 \quad (\text{en extérieur}) \quad \text{dB} \quad (67a)$$

$$L_{loc} = L_{be} \quad (\text{en intérieur}) \quad \text{dB} \quad (67b)$$

et:

$$\sigma_{loc} = u(h) \cdot \sigma_L \quad (\text{en extérieur}) \quad \text{dB} \quad (68a)$$

$$\sigma_{loc} = \sigma_i \quad (\text{en intérieur}) \quad \text{dB} \quad (68b)$$

lorsque l'affaiblissement médian, L_{be} , dû à la pénétration dans les bâtiments, est donné dans la Recommandation UIT-R P.2040, la fonction de la hauteur, $u(h)$, est donnée par l'équation (65) et les écarts types, σ_L et σ_i , sont respectivement donnés par l'équation (64) (ou dans le Tableau 6) et l'équation (66).

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

$$L_b = \max \left[L_{b0p}, L_{bc} + L_{loc} - I \left(\frac{p_L}{100} \right) \sigma_{loc} \right] \quad \text{dB} \quad (69)$$

où:

- L_{b0p} : affaiblissement de transmission de référence non dépassé pendant $p\%$ du temps et pour 50% d'emplacements dû à la propagation LoS 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 (63)
- L_{loc} : valeur médiane de l'affaiblissement en fonction de l'emplacement, donnée par les équations (67a) et (67b)
- $I(x)$: 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 la Pièce jointe 2 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 (68a) et (68b).

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%.

4.10 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:

$$E_p = 199,36 + 20 \log(f) - L_b \quad \text{dB}(\mu\text{V}/\text{m}) \quad (70)$$

où:

- L_b : affaiblissement de transmission de référence non dépassé pendant $p\%$ du temps et pour $pL\%$ d'emplacements calculé au moyen de l'équation (69)
- f : fréquence requise (GHz).

Pièce jointe 1 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 Établissement du profil du trajet

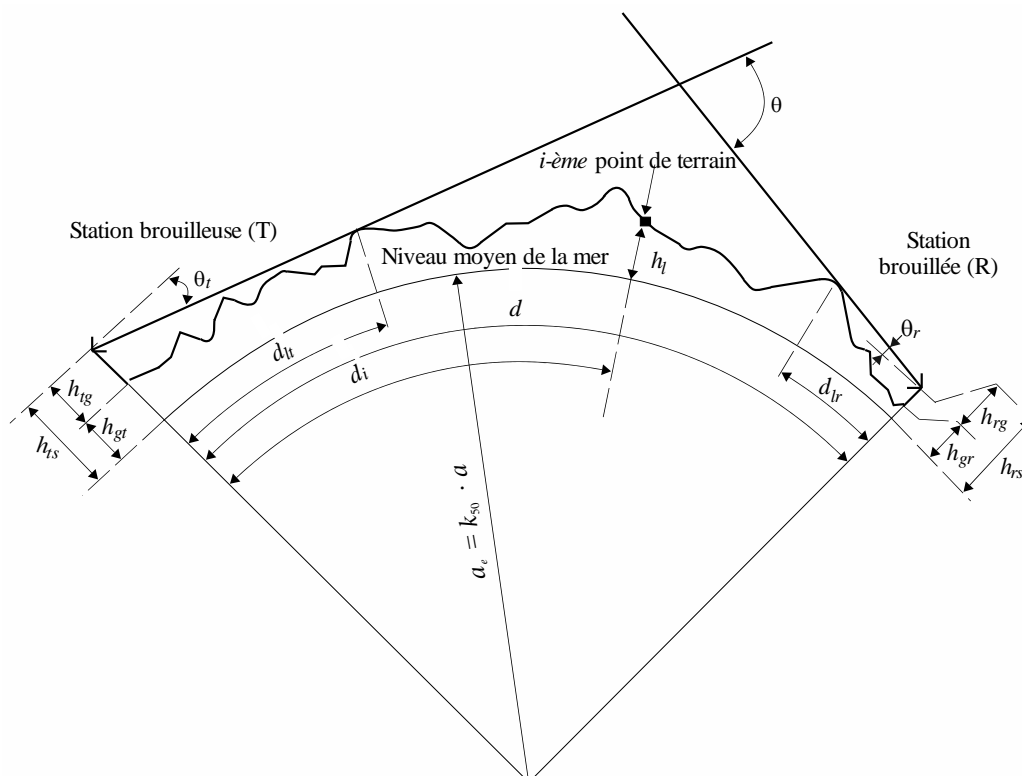
Sur la base des coordonnées géographiques de la station d'émission (φ_t, ψ_t) et de la station de réception (φ_r, ψ_r), il convient de calculer les hauteurs du terrain (au-dessus du niveau moyen de la mer) sur le trajet le long du grand cercle à l'aide d'une base de données topographiques ou de cartes 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. 1 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 1
Exemple d'un profil de trajet (transhorizon)



Note 1 – La valeur θ_i ainsi représentée est négative .

P.1812-0 1

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	Rayon terrestre physique moyen (6 371 km)
a_e	Rayon terrestre équivalent (km)
d	Longueur du trajet le long du grand cercle (km)
d_i	Distance le long du grand cercle du i -ème point du profil par rapport à l'émetteur
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 de l'antenne de la station d'émission au-dessus du niveau moyen de la mer (m)
h_{rs}	Hauteur de l'antenne de la station de réception (m) au-dessus du niveau moyen de la mer

TABLEAU 7 (*fin*)

Paramètre	Description
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 LoS, 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 LoS, 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 de la Terre régulière à l'emplacement de la station d'émission au-dessus du niveau moyen de la mer (m)
h_{sr}	Hauteur de la Terre régulière à l'emplacement de la station de réception au-dessus du niveau moyen de la mer (m)
h_i	Hauteur du i -ème point du terrain au-dessus du niveau moyen de la mer (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 (en fonction du rayon terrestre physique moyen a) 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 règle générale, la longueur du trajet, d (km), peut être déduite des données du profil du trajet suivantes:

$$d = d_n \quad \text{km} \quad (71)$$

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

$$d_i = (i-1)d_{ii} \quad \text{km} \quad (72)$$

où $i = 1, \dots, n$, lorsque d_{ii} est l'incrément de distance du 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_{tr} et d_{tr} , ainsi que des angles d'élévation θ_t et θ_r (voir ci-dessous).

Il faut utiliser le profil du trajet pour déterminer si le trajet est un trajet LoS ou un trajet 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:

$$\theta_{max} > \theta_{td} \quad \text{mrad} \quad (73)$$

où:

$$\theta_{max} = \max_{i=2}^{n-1} (\theta_i) \quad \text{mrad} \quad (74)$$

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

$$\theta_i = 1000 \arctan \left(\frac{h_i - h_{ts}}{10^3 d_i} - \frac{d_i}{2 a_e} \right) \quad \text{mrad} \quad (75)$$

où:

h_i : hauteur du i -ème point du terrain au-dessus du niveau moyen de la mer (m)

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

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

$$\theta_{td} = 1000 \arctan \left(\frac{h_{rs} - h_{ts}}{10^3 d} - \frac{d}{2 a_e} \right) \quad \text{mrad} \quad (76)$$

où:

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

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

5.1 Angle d'élévation de l'antenne d'émission par rapport à l'horizontale locale, θ_t

L'angle d'élévation de l'horizon de l'antenne de la station d'émission par rapport à l'horizontale locale est donné par:

$$\theta_t = \max (\theta_{max}, \theta_{td}) \quad \text{mrad} \quad (77)$$

θ_{max} étant déterminé dans l'équation (74). Ainsi, pour un trajet LoS, l'angle d'élévation de l'antenne d'émission est considéré comme étant l'angle d'élévation de la direction de l'antenne de réception.

5.2 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 (74).

$$d_{lt} = d_i \quad \text{km} \quad \text{pour } \max (\theta_i) \quad (78)$$

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

$$v_{\max} = \max \left\{ \left[h_i + 500C_e d_i (d - d_i) - \frac{h_{ts}(d - d_i) + h_{rs} d_i}{d} \right] \sqrt{\frac{0,002d}{\lambda d_i (d - d_i)}} \right\} \quad (78a)$$

où l'indice du profil i prend des valeurs comprises entre 2 et $n - 1$, et C_e est la courbure équivalente de la Terre définie au § 4.3.1 de l'Annexe 1.

5.3 Angle d'élévation de l'antenne de réception par rapport à l'horizontale locale, θ_r

Pour un trajet LoS, θ_r est donné par:

$$\theta_r = 1000 \arctan \left(\frac{h_{ts} - h_{rs}}{10^3 d} - \frac{d}{2a_e} \right) \quad \text{mrad} \quad (79)$$

Sinon, θ_r est donné par:

$$\theta_r = \max_{j=2}^{n-1} (\theta_j) \quad \text{mrad} \quad (80)$$

$$\theta_j = 1000 \arctan \left[\frac{h_j - h_{rs}}{10^3 (d - d_j)} - \frac{d - d_j}{2a_e} \right] \quad \text{mrad} \quad (80a)$$

5.4 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 (80).

$$d_{lr} = d - d_j \quad \text{km} \quad \text{pour } \max (\theta_j) \quad (81)$$

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

$$d_{lr} = d - d_{lt} \quad \text{km} \quad (81a)$$

5.5 Distance angulaire θ (mrad)

$$\theta = \frac{10^3 d}{a_e} + \theta_t + \theta_r \quad \text{mrad} \quad (82)$$

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

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.

Dans le § 5.6.1, on calcule une surface de la Terre régulière ajustée au profil, à partir de laquelle on calcule les hauteurs de cette surface à l'emplacement des terminaux, à savoir h_{st} et h_{sr} .

Dans le § 5.6.2, les valeurs h_{st} et h_{sr} sont utilisées pour calculer les hauteurs modifiées de la surface de la Terre régulière à l'emplacement des terminaux, h_{std} et h_{srd} , qui sont utilisées dans le § 4.3.4 de l'Annexe 1 pour calculer les hauteurs équivalentes des antennes pour le modèle de diffraction. En fonction du profil, les valeurs de h_{std} et h_{srd} peuvent être différentes de h_{st} et h_{sr} , respectivement.

Dans le § 5.6.3, les valeurs de h_{st} et h_{sr} sont utilisées pour calculer les hauteurs équivalentes des antennes, h_{te} et h_{re} , et un paramètre d'irrégularité du terrain, h_m , dont on a besoin pour le modèle de formation de conduits/réflexion sur les couches décrit au § 4.5 de l'Annexe 1.

5.6.1 Calcul de la surface de la Terre régulière

On calcule les hauteurs dans le cas d'une Terre régulière à l'emplacement des terminaux, h_{st} et h_{sr} , comme suit:

$$v_1 = \sum_{i=2}^n (d_i - d_{i-1})(h_i + h_{i-1}) \quad (83)$$

$$v_2 = \sum_{i=2}^n (d_i - d_{i-1})[h_i(2d_i + d_{i-1}) + h_{i-1}(d_i + 2d_{i-1})] \quad (84)$$

$$h_{st} = \left(\frac{2v_1 d - v_2}{d^2} \right) \quad \text{m} \quad (85)$$

$$h_{sr} = \left(\frac{v_2 - v_1 d}{d^2} \right) \quad \text{m} \quad (86)$$

où:

h_{st} : hauteur au-dessus du niveau moyen de la mer (m) de la surface de la Terre régulière au début du trajet, c'est-à-dire à l'emplacement de l'émetteur

h_{sr} : hauteur au-dessus du niveau moyen de la mer (m) de la surface de la Terre régulière à la fin du trajet, c'est-à-dire à l'emplacement du récepteur.

5.6.2 Hauteurs de la surfaces régulière pour le modèle de diffraction

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

$$h_{obs} = \max(H_i) \quad \text{m} \quad (87a)$$

$$\alpha_{obt} = \max\left(\frac{H_i}{d_i}\right) \quad \text{mrad} \quad (87b)$$

$$\alpha_{obr} = \max\left[\frac{H_i}{(d - d_i)}\right] \quad \text{mrad} \quad (87c)$$

où:

$$H_i = h_i - \frac{[h_{tc}(d - d_i) + h_{rc}d_i]}{d} \quad \text{m} \quad (87d)$$

et l'indice du profil i prend des valeurs comprises entre 2 et $(n - 1)$.

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:

$$h_{stp} = h_{st} \quad \text{m au-dessus du niveau moyen de la mer} \quad (88a)$$

$$h_{srp} = h_{sr} \quad \text{m au-dessus du niveau moyen de la mer} \quad (88b)$$

sinon:

$$h_{stp} = h_{st} - h_{obs}g_t \quad \text{m au-dessus du niveau moyen de la mer} \quad (88c)$$

$$h_{srp} = h_{sr} - h_{obs}g_r \quad \text{m au-dessus du niveau moyen de la mer} \quad (88d)$$

où:

$$g_t = \frac{\alpha_{obt}}{(\alpha_{obt} + \alpha_{obr})} \quad (88e)$$

$$g_r = \frac{\alpha_{obr}}{(\alpha_{obt} + \alpha_{obr})} \quad (88f)$$

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_1 alors:

$$h_{std} = h_1 \quad \text{m au-dessus du niveau moyen de la mer} \quad (89a)$$

sinon:

$$h_{std} = h_{stp} \quad \text{m au-dessus du niveau moyen de la mer} \quad (89b)$$

Si h_{srp} est supérieure à h_n alors:

$$h_{srd} = h_n \quad \text{m au-dessus du niveau moyen de la mer} \quad (89c)$$

sinon:

$$h_{srd} = h_{srp} \quad \text{m au-dessus du niveau moyen de la mer} \quad (89d)$$

5.6.3 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:

$$h_{st} = \min (h_{st}, h_1) \quad \text{m} \quad (90a)$$

$$h_{sr} = \min (h_{sr}, h_n) \quad \text{m} \quad (90b)$$

La pente, m , de la surface de la Terre régulière devrait être calculée à l'aide de la formule:

$$m = \frac{h_{sr} - h_{st}}{d} \quad \text{m/km} \quad (91)$$

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

$$h_{1e} = h_{tg} + h_1 - h_{st} \quad \text{m} \quad (92a)$$

$$h_{re} = h_{rg} + h_n - h_{sr} \quad \text{m} \quad (92b)$$

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:

$$h_m = \max_{i=i_{lt}}^{i_{lr}} [h_i - (h_{st} + md_i)] \quad \text{m} \quad (93)$$

où:

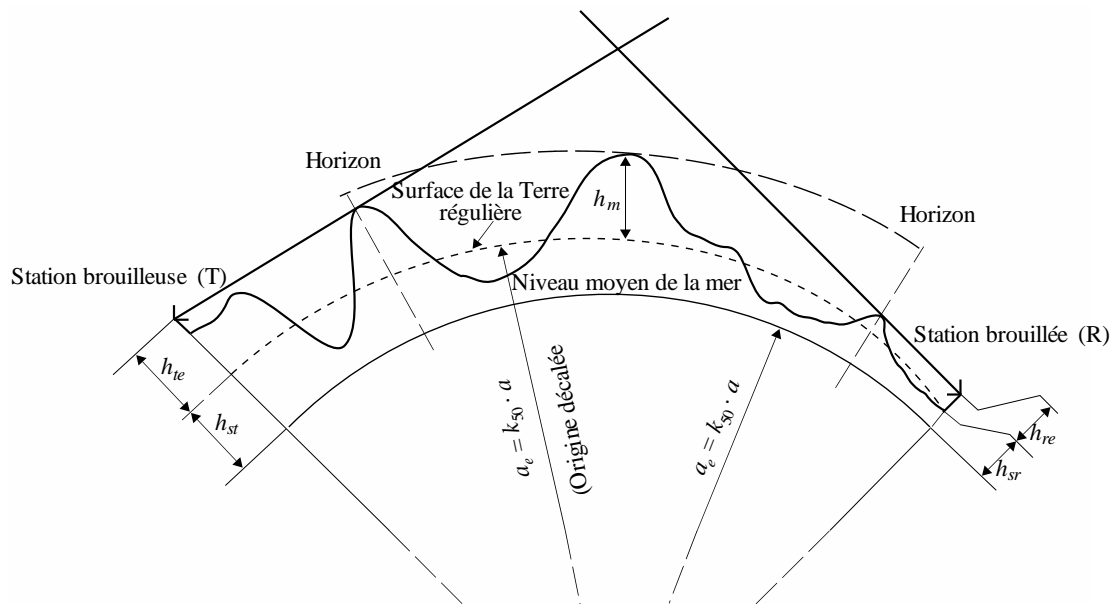
i_{lt} : indice du point du profil à une distance d_{lt} de l'émetteur

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. 2.

FIGURE 2

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



**Pièce jointe 2
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 (40b) et (59) ainsi que dans l'équation (69). 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:

$$I(x) = T(x) - \xi(x) \quad \text{pour } 0,000001 \leq x \leq 0,5 \quad (94a)$$

et, par symétrie:

$$I(x) = \xi(1-x) - T(1-x) \quad \text{pour } 0,5 < x \leq 0,999999 \quad (94b)$$

où:

$$T(x) = \sqrt{[-2 \ln(x)]} \quad (95a)$$

$$\xi(x) = \frac{[(C_2 T(x) + C_1) T(x)] + C_0}{[(D_3 T(x) + D_2) T(x) + D_1] T(x) + 1} \quad (95b)$$

$$C_0 = 2,515516698 \quad (95c)$$

$$C_1 = 0,802853 \quad (95d)$$

$$C_2 = 0,010328 \quad (95e)$$

$$D_1 = 1,432788 \quad (95f)$$

$$D_2 = 0,189269 \quad (95g)$$

$$D_3 = 0,001308 \quad (95h)$$

Pièce jointe 3 à l'Annexe 1

Autre méthode pour calculer l'affaiblissement de diffraction pour une Terre sphérique L_{bulls}

La présente Pièce jointe décrit une autre méthode pour calculer L_{bulls} sans utiliser l'analyse du profil de terrain.

Si $d < d_{los}$ (LoS), calculer le paramètre de diffraction pour la plus petite valeur de la hauteur de dégagement h_{se} (équation (23)) entre le trajet suivant la courbure de la Terre et le rayon entre les antennes avec la distance d_{se1} (équation (24a)):

$$v_{\max} = -h_{se} \cdot \sqrt{\frac{0,002d}{\lambda d_{se1}(d-d_{se1})}} \quad (96)$$

L'affaiblissement sur une arête en lame de couteau en ce point est donné par:

$$L_{us} = J(v_{\max}) \quad \text{dB} \quad (97)$$

Si $d \geq d_{los}$ (sans visibilité directe (NLoS)), trouver la pente la plus forte de la droite qui va de l'antenne de l'émetteur au trajet suivant la courbure de la Terre.

$$S_{tm} = 500C_e d - 2\sqrt{500C_e h_{tesph}} \quad \text{m/km} \quad (98)$$

Trouver ensuite la pente la plus forte de la droite qui va de l'antenne du récepteur au trajet suivant la courbure de la Terre.

$$S_{rm} = 500C_e d - 2\sqrt{500C_e h_{resph}} \quad \text{m/km} \quad (99)$$

Utiliser ces deux pentes pour calculer la distance au point de Bullington comme suit:

$$d_s = \frac{h_{resph} - h_{tesph} + S_{tm}d}{S_{tm} + S_{rm}} \quad \text{km} \quad (100)$$

Calculer le paramètre de diffraction v_s au point de Bullington:

$$v_s = \left[h_{tesph} + S_{tm}d_s - \frac{h_{tesph}(d-d_s) + h_{resph}d_s}{d} \right] \sqrt{\frac{0,002d}{\lambda d_s(d-d_s)}} \quad (101)$$

L'affaiblissement sur une arête en lame de couteau au point de Bullington est donné par:

$$L_{us} = J(v_s) \quad \text{dB} \quad (102)$$

Pour L_{us} calculé à l'aide de l'équation (97) ou (102), l'affaiblissement de diffraction au point de Bullington pour un trajet régulier est donné par:

$$L_{bulls} = L_{us} + \left(1 - \exp\left(\frac{-L_{us}}{6}\right) \right) (10 + 0,02d) \quad (103)$$