

Union internationale des télécommunications

UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

Recommandation UIT-R P.617-5
(08/2019)

**Techniques de prévision de la propagation
et données de propagation nécessaires pour
la conception des faisceaux hertziens
transhorizon**

Série P
Propagation des ondes radioélectriques



Union
internationale des
télécommunications

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.617-5*

Techniques de prévision de la propagation et données de propagation nécessaires pour la conception des faisceaux hertziens transhorizon

(Question UIT-R 205/3)

(1986-1992-2012-2013-2017-2019)

Domaine d'application

La présente Recommandation contient une méthode de prévision de la propagation pour la planification des faisceaux hertziens transhorizon.

Mots clés

Propagation anormale/par réflexion sur les couches, diffraction, transhorizon, diffusion troposphérique.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

- a) que, pour planifier convenablement les faisceaux hertziens transhorizon, il est nécessaire de disposer de méthodes de prévision et de données appropriées sur la propagation;
- b) que l'on a mis au point des méthodes permettant de prévoir la plupart des paramètres de propagation importants qui ont une incidence sur la planification des systèmes de faisceaux hertziens transhorizon;
- c) que l'on a vérifié dans la mesure du possible, ces méthodes au moyen des données de mesure disponibles et constaté qu'elles avaient une précision compatible à la fois avec la nature fluctuante des phénomènes de propagation et adaptée à la plupart des applications actuelles relatives à la planification des systèmes,

recommande

d'utiliser les méthodes de prévision et les autres techniques exposées dans l'Annexe 1 pour la planification des faisceaux hertziens transhorizon dans les domaines de valeurs respectives des paramètres indiqués.

Annexe 1**1 Introduction**

Les seuls mécanismes de propagation radioélectrique transhorizon qui interviennent en permanence aux fréquences supérieures à 30 MHz sont les mécanismes de diffraction à la surface de la Terre et

* 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.

de diffusion due aux irrégularités atmosphériques. En outre, une propagation due au phénomène de conduit ou de réflexion sur les couches peut intervenir occasionnellement. L'affaiblissement des signaux diffractés augmente très rapidement avec la distance et la fréquence, et la probabilité de propagation anormale est relativement faible; en fin de compte, le principal mécanisme à long terme est celui de la diffusion troposphérique. Ces mécanismes peuvent être utilisés pour établir des radiocommunications transhorizon.

En raison du caractère dissemblable de ces trois mécanismes, les trajets liés à la diffraction, au phénomène de conduit ou de réflexion sur les couches et à la diffusion troposphérique doivent être examinés séparément pour prévoir l'affaiblissement et le renforcement de transmission.

La présente Annexe expose la conception des systèmes de faisceaux hertziens transhorizon. L'un de ses objectifs est de présenter sous forme concise des méthodes simples de prévision des distributions annuelles et pour le mois le plus défavorable de l'affaiblissement de transmission total dû à la diffusion troposphérique et au phénomène de conduit/réflexion sur les couches, et des précisions sur leur domaine de validité. Cette Annexe a aussi pour but d'indiquer d'autres renseignements et des techniques que l'on peut recommander pour la planification des systèmes transhorizon.

2 Produits numériques faisant partie intégrante de la Recommandation

Il convient d'utiliser uniquement les versions des fichiers fournies avec la présente Recommandation. Elles font partie intégrante de la présente Recommandation. Le Tableau 1 fournit des détails des produits numériques utilisés dans le cadre de la méthode.

TABLEAU 1
Produits numériques

Nom de fichier	Réf.	Origine	Latitude (lignes)			Longitude (colonnes)		
			Première ligne (°N)	Espacement (en degrés)	Nombre de lignes	Première colonne (°E)	Espacement (en degrés)	Nombre de colonnes
DN50.txt	Annexe 1 P.J. 1	P.452	90	1,5	121	0	1,5	241
N050.txt	Annexe 1 P.J. 1	P.452	90	1,5	121	0	1,5	241

La valeur «Première ligne» est la latitude correspondant à la première ligne.

La valeur «Première colonne» est la longitude correspondant à la première colonne. La dernière colonne est identique à la première colonne ($360^\circ = 0^\circ$) et est fournie afin de simplifier l'interpolation.

L'«espacement» donne l'incrément pour la latitude/longitude d'une ligne/colonne à l'autre.

Les fichiers sont disponibles dans le fichier Supplément [R-REC-P.617-5-201908-I!!ZIP-E.zip](#).

3 Affaiblissement de transmission sur les trajets de diffraction

Pour les trajets radioélectriques ne s'étendant que légèrement au-delà de l'horizon, ou pour les trajets passant au-dessus d'un obstacle ou au-dessus d'un terrain montagneux, c'est généralement la diffraction qui constitue le mode de propagation déterminant pour l'intensité de champ. En pareils cas, il convient d'appliquer les méthodes décrites dans la Recommandation UIT-R P.526.

4 Distribution de l'affaiblissement de transmission dû à la diffusion troposphérique

Les signaux reçus par diffusion troposphérique présentent à la fois des variations lentes et rapides. Les variations lentes sont dues à des modifications générales des conditions de réfraction dans l'atmosphère et les évanouissements rapides au déplacement de zones d'irrégularités peu étendues. Les distributions des médianes horaires de l'affaiblissement de transmission qui sont à peu près log-normales et d'écart types d'environ 4 à 8 dB selon le climat donnent une bonne représentation des variations lentes. Les variations rapides, sur une période d'environ 5 mn, suivent à peu près une distribution de Rayleigh.

Lorsqu'on étudie le fonctionnement des liaisons transhorizon dans des conditions géométriques où la diffusion troposphérique est le phénomène dominant, on a coutume d'estimer la médiane horaire de l'affaiblissement de transmission pour des pourcentages du temps de non-dépassement supérieurs à 50%.

Le paragraphe 4.1 expose une technique semi-analytique simple permettant de prévoir la distribution de l'affaiblissement de transmission annuel moyen. Le paragraphe 4.2 présente la méthode de conversion de ces pourcentages de temps annuels en pourcentages valables pour le mois le plus défavorable moyen. La pièce jointe 1 contient des données additionnelles sur les variations diurnes et saisonnières de l'affaiblissement de transmission, la fréquence des évanouissements rapides, les trajets par diffusion troposphérique et la largeur de bande des émissions.

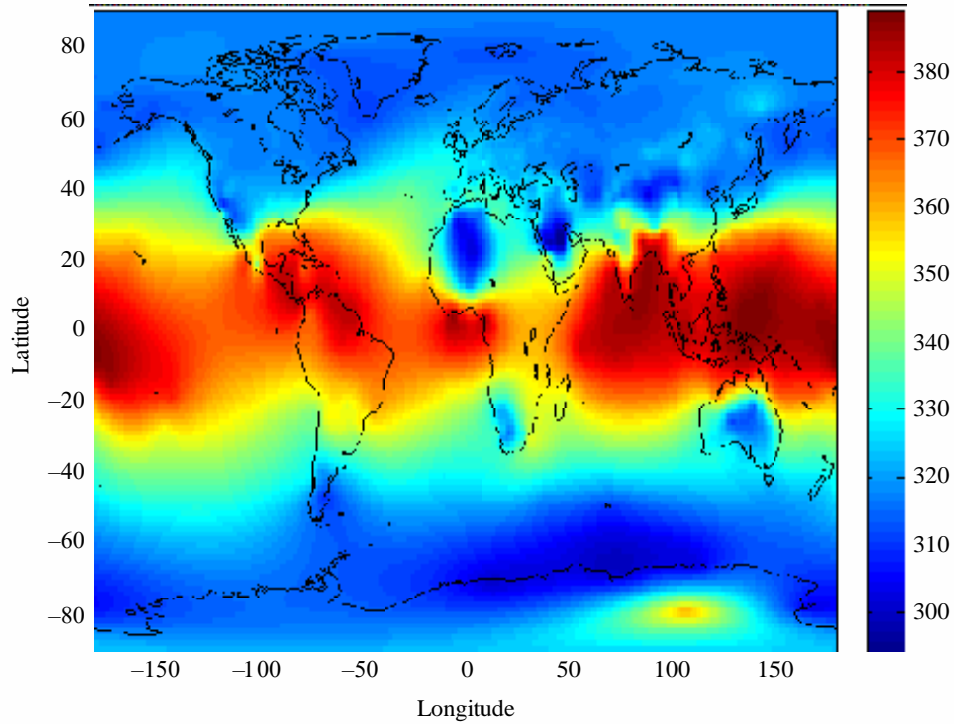
4.1 Distribution des valeurs médianes de l'affaiblissement de transmission annuel moyen

Il est recommandé d'appliquer la méthode pas à pas suivante pour estimer l'affaiblissement de transmission annuel moyen (valeurs médianes) $L(p)$ qui n'est pas dépassé pour des pourcentages de temps p . Il faut connaître les caractéristiques d'une liaison de d (km) le long d'un grand cercle, la fréquence f (MHz), le gain G_t (dB) de l'antenne d'émission, le gain G_r (dB) de l'antenne de réception, l'angle d'élévation de l'horizon θ_t (mrad) à l'émetteur et θ_r (mrad) au récepteur:

Étape 1: Obtenir la valeur annuelle moyenne du coïncide de réfraction au niveau de la surface de la mer N_0 et du gradient de l'indice de réfraction radioélectrique dN pour le volume commun de la liaison en question en utilisant les cartes numériques de la Fig. 1 et de la Fig. 2, respectivement. Ces cartes sont disponibles sous forme électronique sur le site web de la CE 3 de l'UIT-R, conformément aux indications fournies dans le § 2.

FIGURE 1

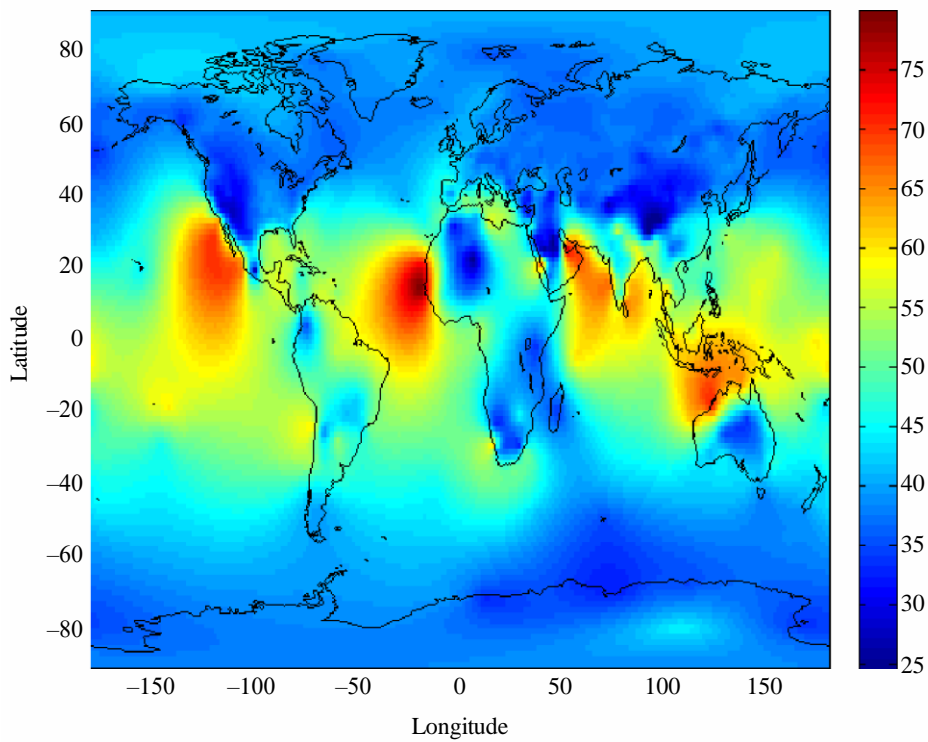
Valeur annuelle moyenne du coïncide de réfraction au niveau de la surface de la mer N_0



P.0617-0.1

FIGURE 2

Valeur moyenne annuelle du gradient de réfraction radioélectrique dN dans le premier kilomètre de l'atmosphère



P.0617-02

Étape 2: Calculer l'angle de diffusion θ (distance angulaire) au moyen de la formule:

$$\theta = \theta_e + \theta_t + \theta_r \quad \text{mrad} \quad (1)$$

où θ_t et θ_r sont les angles de site de l'horizon à l'émetteur et au récepteur respectivement, et

$$\theta_e = d \cdot 10^3 / ka \quad \text{mrad} \quad (2)$$

où:

d : longueur du trajet

$a = 6\,370$ km, rayon de la Terre

k : facteur de rayon équivalent de la Terre pour des conditions de réfraction médianes (on prendra $k = 4/3$ sauf si on connaît une valeur plus précise).

Étape 3: Évaluer la perte de couplage L_c entre l'antenne et le milieu au moyen de la formule:

$$L_c = 0,07 \exp [0,055(G_t + G_r)] \quad \text{dB} \quad (3)$$

où G_t et G_r sont les gains d'antenne.

Étape 4: Estimer l'affaiblissement de transmission annuel moyen lié à la diffusion troposphérique qui n'est pas dépassé pendant $p\%$ du temps au moyen de la formule:

$$L_{bs}(p) = F + 22 \log f + 35 \log \theta + 17 \log d + L_c - Y_p \quad \text{dB} \quad (4)$$

où

$$F = 0,18 N_0 \exp(-h_s/h_b) - 0,23 \text{ dN} \quad \text{dB} \quad (5)$$

$$Y_p = \begin{cases} 0,035 N_0 \exp(-h_0/h_b) \cdot (-\log(p/50))^{0,67} & p < 50 \\ -0,035 N_0 \exp(-h_0/h_b) \cdot (-\log[(100-p)/50])^{0,67} & p \geq 50 \end{cases} \quad (6)$$

$$h_0 = h_t + \frac{d \sin \beta}{\sin(\theta/1000)} \left[\frac{1}{2} \frac{d \sin \beta}{ka \sin(\theta/1000)} + \sin(\theta_t/1000) \right] \quad (7a)$$

L'angle β peut être obtenu par l'équation suivante:

$$\beta = \frac{d}{2ka} + \frac{\theta_r}{1000} + \frac{h_r - h_t}{d} \quad (7b)$$

où h_t et h_r (km) sont respectivement les altitudes de l'antenne d'émission et de l'antenne de réception, avec:

h_s : altitude de la surface de la Terre au-dessus du niveau de la mer (km)

h_b : hauteur d'échelle (km) qui peut être déterminée statistiquement pour différentes conditions climatiques. À titre de référence, on peut définir une moyenne globale de la hauteur d'échelle par $h_b = 7,35$ km.

4.2 Distribution de l'affaiblissement de transmission moyen (valeurs médianes) pour le mois le plus défavorable

Afin de rester cohérent avec la distribution de l'affaiblissement de transmission annuel moyen, la présente distribution sera mieux définie à partir de la distribution annuelle moyenne grâce à un facteur de conversion. La méthode est la suivante:

Étape 1: Si l'on dispose des données statistiques relatives au pourcentage de temps annuel, convertir ce pourcentage en pourcentage valable pour le mois le plus défavorable pour la diffusion

troposphérique, conformément à la Recommandation UIT-R P.841. Si l'on dispose du pourcentage de temps pour le mois le plus défavorable, il est nécessaire d'effectuer le calcul inverse.

Étape 2: Calculer la valeur médiane de l'affaiblissement de transmission pour le mois le plus défavorable pour le pourcentage de temps donné, en substituant le pourcentage de temps annuel donné ou calculé conformément au § 4.1.

5 Distribution de l'affaiblissement et du renforcement de transmission liés au phénomène de conduit/réflexion sur les couches

Le phénomène de conduit et de réflexion sur les couches peut provoquer un renforcement du signal, ce qui peut avoir des conséquences sur la conception du système. Le calcul suivant est identique à celui qui figure dans la Pièce jointe D de la Recommandation UIT-R P.2001-2, intitulée Modèle de propagation anormale/par réflexion sur les couches.

5.1 Caractérisation des zones radioclimatiques prédominantes sur le trajet

On calcule deux distances qui déterminent les tronçons continus du trajet les plus longs qui traversent les zones radioclimatiques suivantes:

d_{lm} : tronçon terrestre continu le plus long du trajet (à l'intérieur des terres ou côtier) (km)

d_{lm} : tronçon continu à l'intérieur des terres le plus long du trajet (km)

Le Tableau 2 décrit les zones radioclimatiques nécessaires pour la classification susmentionnée:

TABLEAU 2
Zones radioclimatiques

Type de zone	Code	Définition
Terrestre côtière	A1	Zones terrestres côtières et littorales, c'est-à-dire adjacentes à la mer jusqu'à une altitude de 100 m par rapport au niveau de la mer ou des eaux mais limitée à une distance de 50 km à partir de l'étendue maritime la plus proche.
À l'intérieur des terres	A2	Toutes les zones terrestres, autres que les zones côtières et littorales entrant dans la catégorie des «zones terrestres côtières» ci-dessus.
Mer	B	Mers, océans et vastes étendues d'eau (c'est-à-dire couvrant un cercle d'un diamètre d'au moins 100 km).

Vastes étendues d'eaux intérieures

Une «vaste» étendue d'eaux intérieures, considérée comme appartenant à la Zone B, est définie comme étant une zone ayant une superficie d'au moins 7 800 km², non compris la zone des rivières. Les îles situées à l'intérieur de ces étendues d'eau seront comptabilisées comme de l'eau pour les calculs concernant ces zones si elles sont à moins de 100 m au-dessus du niveau moyen de la mer sur plus de 90% de la zone à laquelle elles appartiennent. Les îles qui ne répondent pas à ces critères seront classées comme zones terrestres pour le calcul de la superficie des zones d'eau.

Vastes lacs intérieurs et vastes étendues de terres humides

Les vastes étendues d'eaux intérieures de plus de 7 800 km² de superficie qui contiennent un grand nombre de petits lacs ou un réseau de rivières doivent être classées comme zones «côtières» (Zone A1) par les administrations si la zone considérée comprend plus de 50% d'eau et si plus de 90% des terres sont à moins de 100 m au-dessus du niveau moyen des eaux.

Il est difficile de déterminer sans ambiguïté les régions climatiques appartenant à la Zone A1, les vastes étendues d'eaux intérieures, les grands lacs intérieurs et les vastes zones de terres humides. Les administrations sont donc invitées à enregistrer auprès du Bureau des radiocommunications (BR) de l'UIT les régions à l'intérieur de leurs frontières nationales qu'elles souhaitent voir identifiées comme appartenant à l'une de ces catégories. Sans indication contraire, toutes les zones terrestres seront considérées comme appartenant à la Zone radioclimatique A2.

À titre de référence, 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>, peuvent être utilisés.

5.2 Incidence ponctuelle des phénomènes de conduit

On calcule un paramètre en fonction du tronçon terrestre le plus long du trajet, comme suit:

$$\tau = \left[1 - e^{-\left(4,12 \times 10^{-4} \times d_{lm}^{2,41}\right)} \right] \quad (8)$$

On calcule le paramètre μ_1 caractérisant dans quelle mesure le trajet est un trajet terrestre, comme suit:

$$\mu_1 = \left[10^{\frac{-d_{lm}}{16 - 6,6\tau}} + 10^{-(2,48 + 1,77\tau)} \right]^{0,2} \quad (9)$$

où la valeur de μ_1 est limitée à $\mu_1 \leq 1$.

On calcule le paramètre μ_4 , comme suit:

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

où φ_{mn} est la latitude du point à mi-trajet.

L'incidence ponctuelle de la propagation anormale, β_0 (%), au centre du trajet est maintenant donnée par:

$$\beta_0 = \begin{cases} 10^{-0,015|\varphi_{mn}| + 1,67} \mu_1 \mu_4 & \% & \text{pour } |\varphi_{mn}| \leq 70^\circ \\ 4,17 \mu_1 \mu_4 & \% & \text{pour } |\varphi_{mn}| > 70^\circ \end{cases} \quad (11)$$

5.3 Affaiblissements dus à l'effet d'écran du terrain pour ce qui est du mécanisme de propagation anormale

Corrections apportées aux angles d'élévation de l'émetteur et du récepteur au-dessus de l'horizon:

$$g_t = 0,1 \cdot d_{lt} \quad (12)$$

$$g_r = 0,1 \cdot d_{lr} \quad (13)$$

où d_{lt} , d_{lr} (km) sont les distances entre les terminaux et l'horizon, qui, pour des trajets en visibilité directe, correspondent aux distances jusqu'au point où l'affaiblissement par diffraction sur une arête en lame de couteau est le plus important.

Les affaiblissements entre les antennes et les mécanismes de propagation anormale associés à l'effet d'écran du terrain sont calculés comme suit:

Angles d'élévation de l'émetteur et du récepteur au-dessus de l'horizon modifiés:

$$\theta_{st} = \theta_t - g_t \quad \text{mrad} \quad (14)$$

$$\theta_{sr} = \theta_r - g_r \quad \text{mrad} \quad (15)$$

Affaiblissements dus à l'effet d'écran du terrain au niveau de l'émetteur et du récepteur, pour ce qui est du phénomène de conduit:

$$A_{st} = 20 \log[1 + 0,361 \cdot \theta_{st} \cdot (f \cdot d_{lt})^{1/2}] + 0,264 \cdot \theta_{st} \cdot f^{1/3} \quad \text{dB} \cdot \theta_{st} > 0 \quad (16)$$

$$A_{st} = 0 \quad \text{dB} \quad \text{sinon} \quad (17)$$

$$A_{sr} = 20 \log[1 + 0,361 \cdot \theta_{sr} \cdot (f \cdot d_{lr})^{1/2}] + 0,264 \cdot \theta_{sr} \cdot f^{1/3} \quad \text{dB} \cdot \theta_{sr} > 0 \quad (18)$$

$$A_{sr} = 0 \quad \text{dB} \quad \text{sinon} \quad (19)$$

5.4 Corrections de couplage pour des phénomènes de conduit au-dessus de la surface de la mer

On calcule la distance entre chaque terminal et la mer, dans la direction de l'autre terminal:

$$d_{ct} = \text{distance entre la côte et l'émetteur} \quad \text{km} \quad (20)$$

$$d_{cr} = \text{distance entre la côte et le récepteur} \quad \text{km} \quad (21)$$

Les corrections de couplage pour des phénomènes de conduit au-dessus de la surface de la mer, au niveau de l'émetteur et du récepteur, A_{ct} et A_{cr} respectivement, sont nulles dans les deux cas sauf pour les combinaisons suivantes de conditions:

$$A_{ct} = -3 \exp(-0,25d_{ct}^2) [1 + \tanh\{0,07(50 - h_{ts})\}] \quad \text{dB}$$

$$\text{si } (\omega \geq 0,75) \text{ et } (d_{ct} \leq d_{lt}) \text{ et } (d_{ct} \leq 5 \text{ km}) \quad (22)$$

$$A_{ct} = 0 \quad \text{dB} \quad \text{sinon} \quad (23)$$

$$A_{cr} = -3 \exp(-0,25d_{cr}^2) [1 + \tanh\{0,07(50 - h_{rs})\}] \quad \text{dB}$$

$$\text{si } (\omega \geq 0,75) \text{ et } (d_{cr} \leq d_{lr}) \text{ et } (d_{cr} \leq 5 \text{ km}) \quad (24)$$

$$A_{cr} = 0 \quad \text{dB} \quad \text{sinon} \quad (25)$$

où ω est le tronçon du trajet au-dessus de la mer, et où h_{ts} et h_{rs} sont les hauteurs de l'émetteur et du récepteur au-dessus du niveau moyen de la mer.

5.5 Affaiblissement total de couplage dû au mécanisme de propagation anormale

L'affaiblissement total de couplage entre les antennes et le mécanisme de propagation anormale sont maintenant calculés comme suit:

$$A_{ac} = 102,45 + 20 \log[f(d_{lt} + d_{lr})] + A_{lf} + A_{st} + A_{sr} + A_{ct} + A_{cr} \quad \text{dB} \quad (26)$$

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

$$A_{lf} = (45,375 - 137,0f + 92,5f^2) \omega \quad \text{dB} \quad \text{si } f < 0,5 \text{ GHz} \quad (27)$$

$$A_{lf} = 0 \quad \text{dB} \quad \text{sinon} \quad (28)$$

5.6 Affaiblissement en fonction de la distance angulaire

Affaiblissement linéique angulaire dans le mécanisme de propagation anormale:

$$\gamma_d = 5 \cdot 10^{-5} \cdot k \cdot a \cdot f^{1/3} \quad \text{dB/mrad} \quad (29)$$

Angles d'élévation corrigés de l'émetteur et du récepteur au-dessus de l'horizon:

$$\theta_{at} = \min(\theta_t, g_t) \quad \text{mrad} \quad (30)$$

$$\theta_{ar} = \min(\theta_r, g_r) \quad \text{mrad} \quad (31)$$

Distance angulaire totale du trajet corrigée:

$$\theta_a = \frac{1000 \cdot d}{ka} + \theta_{at} + \theta_{ar} \quad \text{mrad} \quad (32)$$

Affaiblissement en fonction de la distance angulaire:

$$A_{ad} = \gamma_d \theta_a \quad \text{dB} \quad (33)$$

5.7 Affaiblissement en fonction de la distance et du temps

Dans le mécanisme de propagation anormale, l'affaiblissement fonction à la fois de la distance du grand cercle et le pourcentage de temps sont calculés en évaluant les paramètres suivants.

Distance ajustée pour tenir compte du facteur d'irrégularité du terrain:

$$d_{ar} = \min(d - d_{lt} - d_{lr}, 40) \quad \text{km} \quad (34)$$

Facteur d'irrégularité du terrain:

$$\mu_3 = \exp\left[-4,6 \times 10^{-5} (h_m - 10)(43 + 6d_{ar})\right] \quad h_m > 10 \text{ m} \quad (35)$$

$$\mu_3 = 1 \quad \text{sinon} \quad (36)$$

où h_m est le paramètre d'irrégularité donné dans la Pièce jointe 2.

Terme requis pour la correction de la géométrie du trajet:

$$\alpha = -0,6 - 3,5 \cdot 10^{-9} \cdot d^{3,1} \cdot \tau \quad (37)$$

Si $\alpha < -3,4$, soit $\alpha = -3,4$

Facteur de géométrie du trajet:

$$\mu_2 = \left[\frac{500d^2}{ka \cdot (\sqrt{h_{te}} + \sqrt{h_{re}})^2} \right]^\alpha \quad (38)$$

Si $\mu_2 > 1$, soit $\mu_2 = 1$, h_{te} et h_{re} sont les hauteurs équivalentes de l'émetteur et du récepteur au-dessus d'une surface lisse donnée dans la pièce jointe 2.

Pourcentage de temps associé à la propagation anormale ajusté pour tenir compte de l'emplacement général et des propriétés particulières du trajet:

$$\beta = \beta_0 \cdot \mu_2 \cdot \mu_3 \quad \% \quad (39)$$

Exposant requis pour l'affaiblissement fonction du temps:

$$\Gamma = \frac{1,076 \cdot \exp\left\{-10^{-6} d^{1,13} \left[9,51 - 4,8 \log \beta + 0,198 (\log \beta)^2\right]\right\}}{(2,0058 - \log \beta)^{1,012}} \quad (40)$$

Affaiblissement fonction du temps:

$$A_{at} = -12 + (1,2 + 0,0037 d) \log\left(\frac{p}{\beta}\right) + 12\left(\frac{p}{\beta}\right)^\Gamma + \frac{50}{q} \quad \text{dB} \quad (41)$$

où $q=100-p$.

5.8 Affaiblissement de transmission de référence associé aux phénomènes de conduit

L'affaiblissement de transmission de base associé à la propagation anormale est donnée par la formule suivante:

$$L_{ba} = A_{ac} + A_{ad} + A_{at} \quad \text{dB} \quad (42)$$

6 Estimation de la distribution de l'affaiblissement de transmission total

Pour des calculs de la dynamique qui exigent une évaluation de la distribution pour de plus faibles pourcentages du temps, on ne peut supposer que l'on se trouve en présence de la seule diffusion troposphérique. Les valeurs de l'affaiblissement de transmission qui ne sont pas dépassées pendant de très faibles pourcentages du temps dépendront du mécanisme de propagation anormale. Il existe une forte corrélation entre la diffusion troposphérique et le mécanisme de propagation par conduit / réflexion sur les couches; ils sont combinés selon la puissance pour ces pourcentages de temps. L'affaiblissement de transmission de base pour ces deux mécanismes peut être combiné pour fournir l'affaiblissement total au moyen des équations (4) et (42).

$$L(p) = -5 \log(10^{-0,2L_{bs}} + 10^{-0,2L_{ba}}) \quad \text{dB} \quad (43)$$

7 Réception en diversité

Les évanouissements profonds qui accompagnent la propagation par diffusion troposphérique diminuent sérieusement les performances des systèmes qui reposent sur ce mode de propagation. On peut atténuer les effets des évanouissements en recourant à la réception en diversité, qui consiste à faire usage de deux signaux ou davantage, dont les évanouissements sont plus ou moins indépendants en raison des différences de longueur des trajets de diffusion ou de fréquence. On sait donc que le recours à la diversité d'espace, d'angle ou de fréquence diminue les pourcentages de temps pendant lesquels de forts affaiblissements de transmission sont dépassés. Toutefois, la diversité d'angle peut avoir le même effet que la diversité verticale d'espace et être plus économique.

7.1 Diversité d'espace

En fonction de ce qui convient le mieux à l'emplacement considéré, on peut recourir à la diversité d'espace dans le sens horizontal ou vertical. Pour les fréquences supérieures à 1 000 MHz, les espacements de diversité appropriés Δh ou Δv sont donnés par les relations empiriques:

$$\Delta h = 0,36 (D^2 + 4I_h^2)^{1/2} \quad \text{m} \quad (44)$$

$$\Delta v = 0,36 (D^2 + 4I_v^2)^{1/2} \quad \text{m} \quad (45)$$

où D est le diamètre de l'antenne (m) et $I_h = 20$ m et $I_v = 15$ m des échelles de longueur empiriques pour les directions horizontale et verticale respectivement.

7.2 Diversité de fréquence

Pour les installations où l'on souhaite recourir à la diversité de fréquence, un écart de fréquence approprié Δf (MHz) est donné pour les fréquences supérieures à 1 000 MHz par la relation:

$$\Delta f = (1,44 f / \theta d) (D^2 + I_v^2)^{1/2} \quad \text{MHz} \quad (46)$$

où:

- f : fréquence (MHz)
- D : diamètre de l'antenne (m)
- θ : angle de diffusion (mrad) tiré de la formule (1)
- I_v : 15 m l'échelle de longueur ci-dessus.

7.3 Diversité d'angle

Il est aussi possible de recourir à la diversité d'angle verticale où l'on utilise avec un même réflecteur deux excitateurs d'antenne ou davantage étagés dans le sens vertical. Il en résulte des volumes communs distincts situés les uns au-dessus des autres comme pour la diversité d'espace verticale. Sur un trajet à peu près symétrique, l'écart angulaire $\Delta \theta_r$ qui donne approximativement le même résultat qu'un espacement vertical Δv (m) (formule (45)) est donné par:

$$\Delta \theta_r = \text{arc tg} (\Delta v / 500d) \quad (47)$$

où d est la longueur du trajet (km).

8 Influence de l'emplacement des stations

L'emplacement des liaisons utilisant la transmission transhorizon demande à être choisi avec un certain soin. Les faisceaux d'antenne ne doivent pas être masqués par des obstacles proches et doivent être pointés légèrement au-dessus de l'horizon. La valeur précise de l'inclinaison optimale des faisceaux d'antenne vers le haut dépend du trajet et des conditions atmosphériques, mais cette inclinaison au-dessus de l'horizon est comprise entre environ 0,2 et 0,6 fois l'ouverture du faisceau de l'antenne.

Une administration a effectué des mesures dans lesquelles on utilisait une antenne ayant un gain de 53 dB, dont on écartait le faisceau de la direction de l'horizon (grand cercle) pour deux émetteurs de 2 GHz, chacun d'eux distant de 300 km; on constata que la puissance reçue diminuait de 9 dB par degré. Cela s'accompagnait d'une augmentation de l'angle de diffusion sur les trois premiers degrés, aussi bien en azimut qu'en élévation, pour chaque trajet, et dans une gamme étendue de pourcentages du temps.

Pièce jointe 1 de l'Annexe 1

Données supplémentaires

1 Variations saisonnières et diurnes de l'affaiblissement de propagation

Dans les climats tempérés, les affaiblissements de propagation présentent des variations annuelles et diurnes. Les médianes mensuelles des affaiblissements ont tendance à être plus élevées en hiver qu'en été. Les valeurs sont comprises entre 10 et 15 dB sur des trajets terrestres de 150-250 km, mais elles diminuent lorsque la distance augmente. Des mesures effectuées dans la partie européenne de la Fédération de Russie sur un trajet de 920 km à 800 MHz montrent une différence de 2 dB seulement entre les médianes obtenues en hiver et en été. Les variations diurnes sont plus marquées en été, les valeurs étant comprises entre 5 et 10 dB sur des trajets terrestres de 100-200 km. Les affaiblissements de propagation les plus importants se produisent dans l'après-midi et les moins importants tôt le matin. Les trajets maritimes ont plus de chance que les trajets terrestres d'être affectés par la superréfraction et les couches élevées; on a donc des variations plus importantes sur les trajets maritimes. Il en est parfois de même dans les régions côtières à terrain plat et bas, dans les zones maritimes.

Dans les climats désertiques secs et chauds, l'affaiblissement est maximal en été. Les variations annuelles des médianes mensuelles pour des trajets de longueur moyenne dépassent 20 dB. Les variations diurnes sont très importantes.

Dans les climats équatoriaux, les variations annuelles ou diurnes sont en général faibles.

Dans les climats de mousson, où des mesures ont été faites (Sénégal, Barbade), les valeurs maximales de N_s , se produisent pendant la saison humide, mais l'affaiblissement minimal a lieu entre la saison humide et la saison sèche.

2 Fréquence des évanouissements rapides sur les trajets avec diffusion troposphérique

Les évanouissements rapides se produisent plusieurs fois par minute aux fréquences basses et plusieurs fois par seconde dans les bandes d'ondes décimétriques. La superposition de plusieurs composantes incohérentes variables donnerait un signal dont l'amplitude obéirait à une loi de distribution de Rayleigh; on constate que cette hypothèse est pratiquement vérifiée si on analyse la répartition pendant des intervalles de temps de durée maximale égale à cinq minutes. Si d'autres types de signaux constituent une fraction importante du signal reçu, cette répartition se trouve modifiée. On a observé des évanouissements rapides, brusques et profonds, au moment où une perturbation frontale affecte une liaison. La réflexion des ondes sur un aéronef peut provoquer des évanouissements rapides très marqués.

La fréquence d'évanouissement rapide a été étudiée du point de vue de la fonction d'autocorrélation dans le temps, ce qui conduit à une «fréquence moyenne d'évanouissement» pendant les brefs instants où le signal est stationnaire. On a observé que la valeur médiane de la fréquence moyenne d'évanouissement croît presque proportionnellement à la longueur du trajet et à la fréquence de la porteuse et décroît légèrement quand le diamètre de l'antenne croît.

Des mesures ont montré que la rapidité d'évanouissement est la plus grande lorsque la médiane horaire de l'affaiblissement de transmission est supérieure à la médiane à long terme. On a en général observé que la fréquence des évanouissements diminuait quand l'affaiblissement de transmission passait au-dessous de la médiane à long terme, les fréquences d'évanouissement les plus faibles survenant dans les cas où la propagation s'effectuait essentiellement par conduits.

Les évanouissements les plus rapides qui se présentent dans le cas de médianes horaires de l'affaiblissement de transmission supérieures à la médiane à long terme sont les plus importants et les quelques résultats de mesure disponibles (à 2 GHz) donnent des fréquences médianes d'évanouissements comprises entre environ 20 et 30 évanouissements/minute.

3 Largeur de bande transmissible

Les diverses hétérogénéités qui produisent la propagation par diffusion créent autant de trajets de propagation différents, variables en nombre et en temps de transmission. Il en résulte que les coefficients de transmission pour deux fréquences voisines ne sont pas entièrement corrélés, d'où une distorsion du signal transmis. La largeur de bande transmissible est la bande de fréquences à l'intérieur de laquelle la distorsion due à ce phénomène est acceptable pour le signal transmis. Cette largeur de bande dépend donc à la fois de la nature du signal transmis (multiplex téléphonique, image de télévision, etc.) et de la distorsion admissible pour ce signal. Des études effectuées en France montrent que:

- l'augmentation du gain des antennes élargit la bande transmissible dans la mesure où il y a aussi accroissement de la baisse de gain (c'est-à-dire pour des gains supérieurs à environ 30 dB);
- les autres conditions restant égales, la largeur de bande transmissible dépend de la structure de l'atmosphère et donc de la zone climatique considérée;
- la largeur de bande transmissible diminue lorsque la distance augmente, mais suivant une loi qui n'est pas la même dans tous les climats;
- la largeur de bande transmissible est plus petite si l'angle de départ est positif; elle est plus grande si cet angle est négatif.

Pièce jointe 2 de l'Annexe 1

Hauteurs équivalentes et paramètre d'irrégularité du terrain

La modélisation suivante est identique à celle qui figure au § 3.8 de la Recommandation UIT-R P.2001-2, intitulé Hauteurs équivalentes et paramètre d'irrégularité du terrain.

Les hauteurs équivalentes de l'émetteur et du récepteur au-dessus du terrain sont calculées par rapport à une surface régulière adaptée au profil, comme suit.

Calculer les valeurs provisoires initiales de la hauteur de la surface régulière aux extrémités du trajet où se trouvent l'émetteur et le récepteur comme suit:

$$v_1 = \sum_{i=2}^n (d_i - d_{i-1})(h_i + h_{i-1}) \quad (48)$$

$$v_2 = \sum_{i=2}^n (d_i - d_{i-1})[h_i(2d_i + d_{i-1}) + h_{i-1}(d_i + 2d_{i-1})] \quad (49)$$

$$h_{stip} = \left(\frac{2v_1 d - v_2}{d^2} \right) \quad \text{m au-dessus du niveau de la mer} \quad (50)$$

$$h_{srip} = \left(\frac{v_2 - v_1 d}{d^2} \right) \quad \text{m au-dessus du niveau de la mer} \quad (51)$$

où d_i est la distance du i ème point du profil depuis l'émetteur (km), h_i est la hauteur du i ème point du profil au-dessus du niveau de la mer (m), $i: 1, 2, 3 \dots n$, est l'indice du point du profil, et n est le nombre de points du profil.

Si $h_{ts} - h_{stip} < 1$, ré-évaluer h_{stip} au moyen de la formule suivante:

$$h_{stip} = h_{ts} - 1 \quad \text{m au-dessus du niveau de la mer} \quad (52)$$

où $h_{ts} = h_1 + h_{tg}$, h_{tg} est la hauteur du centre électrique de l'antenne d'émission.

Si $h_{rs} - h_{srip} < 1$, ré-évaluer h_{sr} au moyen de la formule suivante:

$$h_{srip} = h_{rs} - 1 \quad \text{m au-dessus du niveau de la mer} \quad (53)$$

où $h_{rs} = h_n + h_{rg}$, h_{rg} est la hauteur de l'antenne de réception au-dessus du sol.

La pente de la courbe de régression selon la méthode des moindres carrés est calculée comme suit:

$$m = \frac{h_{srip} - h_{stip}}{d} \quad \text{m/km} \quad (54)$$

Les hauteurs équivalentes des antennes de l'émetteur et du récepteur au-dessus de la surface régulière sont maintenant données par:

$$h_{te} = h_{ts} - h_{stip} \quad \text{m} \quad (55)$$

$$h_{re} = h_{rs} - h_{srip} \quad \text{m} \quad (56)$$

Le paramètre d'irrégularité du terrain est calculé comme suit:

$$h_m = \max \left[h_i - (h_{stip} + m d_i) \right] \quad \text{m} \quad (57)$$

où l'indice du profil i prend toutes les valeurs comprises entre i_{lt} et i_{lr} inclus. i_{lt} et i_{lr} sont des indices du profil des distances à l'horizon de l'émetteur et du récepteur.