Union internationale des télécommunications

UIT-R

Secteur des Radiocommunications de l'UIT

Recommandation UIT-R P.834-9

(12/2017)

Effets de la réfraction troposphérique sur la propagation des ondes radioélectriques

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 https://www.itu.int/ITU-R/go/patents/fr, où l'on trouvera également les Lignes directrices pour la mise en oeuvre de la politique commune en matière de brevets de l'UIT-T, l'UIT-R, l'ISO et la CEI et la base de données en matière de brevets de l'UIT-R.

Séries des Recommandations UIT-R

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

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

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

Publication électronique
Genève, 2018

© UIT 2018

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.834-9*

Effets de la réfraction troposphérique sur la propagation des ondes radioélectriques

(Question UIT-R 201/3)

(1992-1994-1997-1999-2003-2005-2007-2015-2016-2017)

Domaine d'application

La Recommandation UIT-R P.834 décrit des méthodes de calcul des effets de la réfraction à grande échelle dans l'atmosphère, y compris la courbure des rayons, les conduits, le rayon équivalent de la Terre, les angles d'élévation et de visée apparents sur les trajets Terre-espace et la longueur effective du trajet radioélectrique.

Mots clés

Différence de longueur de trajet due aux effets troposphériques, liaison Terre-espace, systèmes mondiaux de navigation par satellite (GNSS), produit météorologique numérique, cartes numériques

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

a) que, pour planifier correctement les liaisons de Terre et les liaisons Terre-espace, il est nécessaire de disposer de procédures de calcul appropriées permettant d'évaluer les effets de la réfraction sur les signaux radioélectriques;

b) que des procédures ont été mises au point pour permettre de calculer certains effets de réfraction sur la propagation des signaux radioélectriques dans les liaisons de Terre et les liaisons Terre-espace,

recommande

que l'on utilise l'information contenue dans l'Annexe 1 pour calculer les effets de la réfraction à grande échelle.

Annexe 1

1 Courbure des rayons

Un rayon radioélectrique traversant la couche inférieure (non ionisée) de l'atmosphère est courbé par l'existence d'un gradient de l'indice de réfraction. Comme l'indice de réfraction varie principalement avec l'altitude, dans la plupart des cas, on considère seulement le gradient vertical de l'indice de réfraction. La courbure en un point est alors contenue dans le plan vertical et s'exprime par:

* La Commission d'études 3 des radiocommunications a apporté des modifications rédactionnelles à cette Recommandation en 2020 conformément aux dispositions de la Résolution UIT-R 1.

$$\frac{1}{\rho} = -\frac{\cos\varphi}{n}\,\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}h} \tag{1}$$

où:

ρ: rayon de courbure de la trajectoire du rayon

n: indice de réfraction de l'atmosphère

$\mathrm{d}n/\mathrm{d}h$: gradient vertical de l'indice de réfraction

h: altitude du point au-dessus de la surface terrestre

φ: angle de la trajectoire du rayon avec l'horizontale au point considéré.

La courbure des rayons est définie comme étant positive quand sa concavité est orientée vers la surface de la Terre. Ce phénomène ne dépend pratiquement pas de la fréquence si le gradient de l'indice ne varie pas d'une façon significative sur une distance égale à la longueur d'onde.

2 Rayon équivalent de la Terre

Si le trajet est à peu près horizontal, φ est voisin de zéro. Comme, d'autre part, n est très voisin de 1, l'équation (1) se simplifie ainsi:

$$\frac{1}{\rho} = -\frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}h} \tag{2}$$

On voit que si le gradient vertical est constant, les trajectoires sont des arcs de cercle.

Si le profil du coïndice en fonction de l'altitude est linéaire, c'est-à-dire si le gradient du coïndice est constant le long du trajet du rayon, il est possible, par transformation, de considérer que la propagation est rectiligne. Pour cette transformation, on considère un rayon terrestre équivalent hypothétique $R_e = ka$, avec:

$$\frac{1}{ka} = \frac{1}{a} + \frac{\mathrm{d}n}{\mathrm{d}h} = \frac{1}{R_e} \tag{3}$$

où a est le rayon réel de la Terre, et k est le facteur lié au rayon terrestre équivalent (le facteur k). Moyennant cette transformation géométrique, les trajectoires des rayons sont rectilignes, quel que soit l'angle d'élévation.

Plus précisément, le gradient du coïndice n'est constant que si le trajet est horizontal. Dans la pratique, pour des altitudes inférieures à 1 000 m, le modèle exponentiel pour le profil d'indice de réfraction moyen (voir la Recommandation UIT-R P.453) peut être représenté approximativement par un modèle linéaire. Le facteur k correspondant est $k = 4/3$.

3 Indice de réfraction modifié

Pour certaines applications, par exemple en matière de tracé de rayon, on utilise un indice de réfraction modifié ou un module de réfraction dont les définitions sont données dans la Recommandation UIT-R P.310. Le module de réfraction M est donné par:

$$M = N + \frac{h}{a} \tag{4}$$

h étant l'altitude du point considéré exprimée en mètres et *a* le rayon terrestre exprimé en milliers de kilomètres. Cette transformation permet de se ramener à la propagation au-dessus d'une Terre plate qui serait surmontée d'une atmosphère dont le coïndice serait égal au module de réfraction *M*.

4 Angle de visée apparent sur les trajets obliques

4.1 Introduction

Dans les études de partage, il est nécessaire d'évaluer l'angle d'élévation apparent d'une station spatiale, qui tient compte de la réfraction atmosphérique. Une méthode de calcul appropriée est donnée ci-dessous.

4.2 Visibilité de la station spatiale

Comme cela est décrit au § 1 ci-dessus, tout faisceau radioélectrique émis par une station à la surface de la Terre située à une altitude de *h* (km) et avec un angle d'élévation de θ (degrés) est courbé – la concavité étant orientée vers la Terre – en raison de l'effet de la réfraction atmosphérique. On peut évaluer le terme de correction de la réfraction, τ (degrés), par l'intégrale suivante:

$$\tau = -\int_h^{\infty} \frac{n'(x)}{n(x) \cdot \tan\varphi} \, dx \tag{5}$$

où φ est déterminé comme suit sur la base de la loi de Snell en coordonnées polaires:

$$\cos\varphi = \frac{c}{(r + x) \cdot n(x)} \tag{6}$$

$$c = (r + h) \cdot n(h) \cdot \cos\theta \tag{7}$$

r: rayon terrestre (6 370 km)

x: altitude (km).

Du fait que la déviation du faisceau est en très grande partie déterminée par la partie inférieure de l'atmosphère, on peut calculer l'indice de réfraction d'une atmosphère type à une altitude *x* à partir des coefficients suivants:

$$n(x) = 1 + a \cdot \exp(-bx) \tag{8}$$

où:

$a = 0{,}000315$

$b = 0{,}1361$.

Ce modèle est fondé sur le modèle atmosphérique exponentiel défini dans la Recommandation UIT-R P.453 pour la propagation de Terre. Par ailleurs, $n'(x)$ est la dérivée de $n(x)$, à savoir $n'(x) = -ab \exp(-bx)$.

Les valeurs de τ (*h*, θ) (degrés) ont été évaluées dans l'hypothèse de l'atmosphère de référence; la formule numérique suivante semble donner une bonne approximation:

$$\tau(h, \theta) = 1/\left[1{,}314 + 0{,}6437\,\theta + 0{,}02869\,\theta^2 + h\,(0{,}2305 + 0{,}09428\,\theta + 0{,}01096\,\theta^2) + 0{,}008583\,h^2\right] \tag{9}$$

Cette approximation a été obtenue pour $0 \le h \le 3$ km et $\theta_m \le \theta \le 10°$, où θ_m, angle auquel le faisceau radioélectrique est juste intercepté par la surface de la Terre, est donné par:

$$\theta_m = -\arccos\left(\frac{r}{r+h} \cdot \frac{n(0)}{n(h)}\right) \tag{10}$$

ou, de manière approchée, $\theta_m = -0{,}875\sqrt{h}$ (degrés).

L'équation (9) donne aussi une approximation raisonnable pour $10° < \theta° \leq 90°$.

Soit θ_0 (degrés) l'angle d'élévation d'une station spatiale dans les conditions de propagation en espace libre et soit θ_m l'angle d'élévation minimal d'une station à la surface de la Terre pour lequel le faisceau radioélectrique n'est pas intercepté par la surface de la Terre. Le terme de correction de la réfraction correspondant à θ_m est $\tau(h, \theta_m)$. La station spatiale n'est donc visible que lorsque l'inégalité suivante est vérifiée:

$$\theta_m - \tau(h, \theta_m) \leq \theta_0 \tag{11}$$

4.3 Evaluation de l'angle d'élévation apparent

Lorsque l'inégalité dans l'équation (11) est vérifiée, on peut calculer l'angle d'élévation apparent, θ (degrés), qui tient compte de la réfraction atmosphérique, en résolvant l'équation suivante:

$$\theta - \tau(h, \theta) = \theta_0 \tag{12}$$

et la solution de l'équation (12) est donnée par:

$$\theta = \theta_0 + \tau_s(h, \theta_0) \tag{13}$$

où les valeurs de $\tau_s(h, \theta_0)$ sont identiques à celles de $\tau(h, \theta)$, mais sont exprimées comme une fonction de θ_0.

La formule numérique suivante donne une bonne approximation de la fonction $\tau_s(h, \theta_0)$ (degrés):

$$\tau_s(h, \theta_0) = 1/[1{,}728 + 0{,}5411\,\theta_0 + 0{,}03723\,\theta_0^2 + h\,(0{,}1815 + 0{,}06272\,\theta_0 + 0{,}01380\,\theta_0^2) + h^2\,(0{,}01727 + 0{,}008288\,\theta_0)] \tag{14}$$

La valeur de θ calculée par l'équation (13) est l'angle d'élévation apparent.

4.4 Récapitulation des calculs

Etape 1: L'angle d'élévation d'une station spatiale dans les conditions de propagation en espace libre est désigné par θ_0.

Etape 2: En utilisant les équations (9) et (10), on examine si l'inégalité (11) est vérifiée. Si elle ne l'est pas, le satellite n'est pas visible et il en découle qu'aucun autre calcul n'est nécessaire.

Etape 3: Si l'inégalité (11) est vérifiée, on calcule θ au moyen des équations (13) et (14).

4.5 Résultats de mesures de l'angle de visée apparent

Le Tableau 1 présente des valeurs moyennes de l'écart angulaire pour la propagation à travers l'atmosphère tout entière. Il donne une récapitulation des données expérimentales obtenues par des

techniques radar, au moyen d'un radiomètre et d'un radiotélescope. On observe des fluctuations de l'angle d'élévation apparent, en raison des variations locales de la structure de l'indice de réfraction.

TABLEAU 1

Ecart angulaire pour la propagation à travers l'atmosphère tout entière

Angle d'élévation, θ (degrés)	**Ecart angulaire total moyen, Δθ (degrés)**			
	Air continental polaire	**Air continental tempéré**	**Air marin tempéré**	**Air marin tropical**
1	0,45	–	–	0,65
2	0,32	0,36	0,38	0,47
4	0,21	0,25	0,26	0,27
10	0,10	0,11	0,12	0,14
20		0,05	0,06	
30		0,03	0,04	
	Variations journalières de Δθ (pour les colonnes 1 et 4 seulement)			
1	0,1 valeur quadratique moyenne			
10	0,007 valeur quadratique moyenne			

5 Affaiblissement dû à l'élargissement du faisceau pour la propagation dans l'atmosphère

L'affaiblissement dû à l'élargissement du faisceau, A_{bs}, est un affaiblissement non ohmique dû à l'étalement du faisceau de l'antenne en élévation dans le plan vertical en raison de la variation de l'indice de réfraction radioélectrique en fonction de la hauteur. Ce phénomène est insignifiant dès que l'angle d'élévation dépasse 5°.

L'affaiblissement du signal dû à l'élargissement du faisceau pour une onde se propageant dans toute l'atmosphère dans les sens Terre vers espace et espace vers Terre est donné par:

$$A_{bs} = -10 \log(B) \qquad \text{(dB)} \tag{15}$$

où:

$$B = 1 - \frac{0{,}5411 + 0{,}07446\theta_0 + h(0{,}06272 + 0{,}0276\theta_0) + h^2 0{,}008288}{\left[1{,}728 + 0{,}5411\theta_0 + 0{,}03723{\theta_0}^2 + h\left(0{,}1815 + 0{,}06272\theta_0 + 0{,}0138{\theta_0}^2\right) + h^2(0{,}01727 + 0{,}008288\theta_0)\right]^2} \tag{16}$$

où:

θ_0: angle d'élévation de la ligne reliant les points d'émission et de réception (degrés) ($\theta_0 < 10°$)

h: altitude du point le plus bas au-dessus du niveau de la mer (km) ($h \leq 5$ km)

6 Différence de longueur du trajet radioélectrique et variations associées

Etant donné que l'indice de réfraction troposphérique est supérieur à 1 et dépend de l'altitude, la longueur du trajet radioélectrique d'une onde se propageant entre le sol et un satellite est supérieure à la longueur du trajet géométrique. La différence de longueur est donnée par la formule suivante:

$$\Delta L = \int_A^B (n-1)\, \mathrm{d}s \tag{17}$$

où:

s: abscisse curviligne le long du trajet

n: indice de réfraction

A et B: extrémités du trajet.

On ne peut utiliser l'équation (17) que si la variation de l'indice de réfraction n le long du trajet est connue.

Lorsque la température T, la pression atmosphérique P et l'humidité relative H au niveau du sol sont connues, on peut calculer la différence de longueur de trajet ΔL selon la méthode semi-empirique expliquée ci-après, méthode qui a été établie à partir des courbes obtenues par radiosondage atmosphérique au cours d'une campagne de mesures d'un an effectuées dans 500 stations météorologiques en 1979. Dans cette méthode, l'expression générale de la différence de la longueur de trajet ΔL est la suivante:

$$\Delta L = \frac{\Delta L_V}{\sin \varphi_0 \, (1 + k \cot^2 \varphi_0)^{1/2}} + \delta\,(\varphi_0, \Delta L_V) \tag{18}$$

où:

φ_0: angle d'élévation au point d'observation

ΔL_V: différence de longueur de trajet verticale

k et $\delta\,(\varphi_0, \Delta L_V)$: paramètres correctifs pour le calcul desquels on utilise le modèle atmosphérique exponentiel.

Le facteur k intègre la variation de l'angle d'élévation le long du trajet. Le paramètre $\delta\,(\varphi_0, \Delta L_V)$ exprime les effets de la réfraction (le trajet n'est pas une ligne droite). Il est toujours très petit, sauf pour des angles d'élévation très faibles, et il est négligé dans le calcul; il induit une erreur de 3,5 cm seulement pour un angle φ_0 de 10° et de 0,1 mm pour un angle φ_0 de 45°. On notera par ailleurs qu'à des angles d'élévation très petits pour lesquels le paramètre δ ne serait pas négligeable, l'hypothèse d'une atmosphère plane en couches, qui constitue la base de toutes les méthodes de calcul de la différence de longueur de trajet, n'est plus valable.

La différence de longueur de trajet verticale (m) est donnée par la formule suivante:

$$\Delta L_V = 0{,}00227\, P + f(T)\, H \tag{19}$$

Dans le premier terme de la partie droite de l'équation (19), P est la pression atmosphérique (hPa) au point d'observation.

Dans le second terme à caractère empirique, H est l'humidité relative (%); la fonction de la température $f(T)$, qui dépend des coordonnées géographiques, est donnée par la formule suivante:

$$f(T) = a\, 10^{bT} \tag{20}$$

où:

T est exprimé en °C

a est exprimé en m/% d'humidité relative

b est exprimé en °C^{-1}.

Les paramètres *a* et *b*, qui sont fonction des coordonnées géographiques, sont donnés dans le Tableau 2.

TABLEAU 2

Coordonnées géographiques	***a*** **(m/%)**	***b*** **(°C^{-1})**
Zones côtières (îles ou lieux situés à moins de 10 km de la côte)	$5{,}5 \times 10^{-4}$	$2{,}91 \times 10^{-2}$
Zones équatoriales non côtières	$6{,}5 \times 10^{-4}$	$2{,}73 \times 10^{-2}$
Toutes les autres zones	$7{,}3 \times 10^{-4}$	$2{,}35 \times 10^{-2}$

Pour calculer le facteur correctif *k* de l'équation (18), on suppose une variation exponentielle du coïndice de réfraction atmosphérique *N* en fonction de l'altitude *h*:

$$N(h) = N_s \exp(-h / h_0) \tag{21}$$

où N_s est la valeur moyenne du coïndice de réfraction à la surface de la Terre (voir la Recommandation UIT-R P.453) et h_0 est donné par la formule suivante:

$$h_0 = 10^6 \frac{\Delta L_V}{N_s} \tag{22}$$

k est ensuite calculé à partir de l'expression suivante:

$$k = 1 - \left[\frac{n_s \, r_s}{n(h_0) \, r(h_o)} \right]^2 \tag{23}$$

où n_s et $n(h_0)$ sont respectivement les valeurs de l'indice de réfraction à la surface de la Terre et à une altitude h_0 (donnée par l'équation (22)) et r_s et $r(h_0)$ sont les distances correspondantes par rapport au centre de la Terre.

Pour les trajets Terre-espace avec des angles d'élévation θ, la différence de longueur due aux effets troposphériques, $\Delta L(\theta)$, (m), peut s'exprimer comme la somme d'un terme hydrostatique et d'un terme humide, $\Delta L_H(\theta)$ *et* $\Delta L_W(\theta)$.

La différence de longueur d'un trajet dans la direction verticale, ΔL_{Hv} et ΔL_{Wv}, peut être projetée à un angle d'élévation θ supérieur à 3°, en utilisant deux fonctions de mappage distinctes pour les composantes hydrostatique et humide, $m_H(\theta)$ et $m_W(\theta)$:

$$\Delta L(\theta) = \Delta L_H(\theta) + \Delta L_W(\theta) = \Delta L_{Hv} \cdot m_H(\theta) + \Delta L_{Wv} \cdot m_W(\theta) \qquad \text{m} \tag{24}$$

La composante hydrostatique verticale à la surface de la Terre, ΔL_{Hvs}, peut être obtenue à l'aide de la formule suivante:

$$\Delta L_{Hvs} = 10^{-6} \frac{R_d}{g_{ms}} k_1 \cdot p_s \qquad \text{m} \tag{24a}$$

La composante humide verticale à la surface de la Terre, ΔL_{Wvs}, peut être obtenue à l'aide de la formule suivante:

$$\Delta L_{Wvs} = 10^{-6} \frac{R_d}{g_{ms}} \frac{k_2}{(\lambda+1)} \cdot \frac{e_s}{T_{ms}} \qquad \text{m} \tag{24b}$$

où:

p_s, e_s: pression totale de l'air et pression partielle de la vapeur d'eau à la surface de la Terre (hPa)

T_{ms}: température moyenne de la colonne de vapeur d'eau au-dessus de la surface (K)

λ: facteur de décroissance de la pression de la vapeur

R_d: R/M_d = 287,0 (J/kg K)

R: constante des gaz parfaits = 8,314 (J/mol K)

M_d: masse molaire de l'air sec = 28,9644 (g/mol)

k_1: 77,604 (K/hPa)

k_2: 373 900 (K^2/hPa)

g_{ms} = $g_m(h_s)$

$g_m(h)$ = 9,784 · (1 – 0,00266 · cos (2 · lat) – 0,00028 · h)

= accélération due à la pesanteur au centre de la masse d'air à partir de l'altitude h (m/s^2)

lat: latitude de l'emplacement (radians)

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

h: altitude du récepteur au-dessus du niveau moyen de la mer (km).

Pour les récepteurs situés à une altitude h, différente de l'altitude h_s, les composantes hydrostatique et humide verticales, $\Delta L_{Hv}(h)$ *et* $\Delta L_{Wv}(h)$, sont données par les formules suivantes:

$$\Delta L_{Hv}(h) = 10^{-6} \frac{R_d}{g_m(h)} k_1 \cdot p(h) \qquad \text{m} \tag{25a}$$

$$\Delta L_{Wv}(h) = 10^{-6} \frac{R_d}{g_m(h)} \frac{k_2}{(\lambda+1)} \cdot \frac{e(h)}{T_m(h)} \qquad \text{m} \tag{25b}$$

où:

On peut déduire les valeurs des paramètres météorologiques d'entrée à l'altitude h ($T_m(h)$, $e(h)$ et $p(h)$) des valeurs à la surface de la Terre (T_{ms}, e_s et p_s), à l'aide des formules suivantes:

$$T_m(h) = T_{ms} - \alpha_m \cdot (h - h_s) \qquad \text{K} \tag{26a}$$

$$p(h) = p_s \left[1 - \frac{\alpha \cdot (h - h_s)}{T_s} \right]^{\frac{g}{R'_d \alpha}} \qquad \text{hPa} \tag{26b}$$

$$e(h) = e_s \cdot \left[\frac{p(h)}{p_s} \right]^{\lambda+1} \qquad \text{hPa} \tag{26c}$$

où:

α_m: taux de variation de la température moyenne de la vapeur d'eau à partir de la surface de la Terre (K/km)

T_s = température de l'air à la surface de la Terre (K) = $T_{ms} \Big/ \left[1 - \frac{\alpha R'_d}{(\lambda+1) g} \right]$ K (26d)

α = taux de variation de la température de l'air à partir de la surface de la Terre

$$\alpha = 0{,}5 \cdot \left[\frac{(\lambda+1)\cdot g}{R'_d} - \sqrt{\frac{(\lambda+1)\cdot g}{R'_d}\left[\frac{(\lambda+1)\cdot g}{R'_d} - 4\alpha_m\right]} \right] \quad \text{K/km} \tag{26e}$$

$$R'_d = R_d / 1000 = 0{,}287 \quad \text{J/(g K)} \tag{26f}$$

g = $9{,}806 \cdot (1 - 0{,}002637 \cdot \cos(2 \cdot lat) - 0{,}00031 \cdot h_s)$ = accélération due à la pesanteur à la surface de la Terre m/s^2

On peut obtenir tous les paramètres d'entrée du modèle (p_s, e_s, T_{ms}, λ et α_m) en supposant que les paramètres météorologiques se caractérisent par la variation saisonnière.

$$X_i(D_y) = a1_i - a2_i \cos\left[2\pi \frac{(D_y - a3_i)}{365{,}25} \right] \tag{27a}$$

où:

X_i : p_s, e_s, T_{ms}, λ ou αm. Indice i: 1 désigne p_s, 2 désigne e_s, 3 désigne T_{ms}, 4 désigne λ, 5 désigne α_m

$a1_i$: valeur moyenne du paramètre

$a2_i$: variation saisonnière du paramètre

$a3_i$: jour correspondant à la valeur minimale du paramètre

D_y : jour de l'année (1, 2, ..., 365,25),
1 = 1er janvier, 32 = 1er février, 60,25 = 1er mars.

Les coefficients $a1$, $a2$ et $a3$ des paramètres p_s, e_s, T_{ms}, λ, et α_m, et l'altitude du niveau de référence (h_{ref}) à laquelle ces coefficients ont été calculés font partie intégrante de la présente Recommandation et sont fournis sous la forme de cartes numériques dans le fichier R-REC-P.834-9-201712-I!!ZIP-E.

Les valeurs sont données entre 0° et 360° en longitude et entre +90° et –90° en latitude, avec une résolution de 1,5° en latitude et en longitude. On peut obtenir la différence de longueur du trajet à tout emplacement voulu et à toute altitude h au-dessus de la surface de la Terre, à l'aide de la méthode suivante:

a) Déterminer, à partir des cartes numériques, les coefficients $a1_i$, $a2_i$ et $a3_i$ de chacun des cinq paramètres, p_s, e_s, T_{ms}, λ et α_m, et l'altitude de référence h_{ref}, aux quatre points de la grille les plus proches de l'emplacement voulu.

b) Calculer la valeur des cinq paramètres, p_s, e_s, T_{ms}, λ et α_m, à l'altitude de référence h_{ref} pour le jour de l'année D_y (X'_{i1}, X'_{i2}, X'_{i3} et X'_{i4}) aux quatre points de la grille les plus proches, à l'aide de la formule (27), avec les coefficients $a1_i$, $a2_i$ et $a3_i$ pour chaque point de la grille; à savoir, $p^i(h^i_{ref})$, $e^i(h^i_{ref})$, $T^i_m(h^i_{ref})$, λ^i et α^i_m pour h^i_{ref}, où i = {1, 2, 3 et 4}. Il est à noter que l'exposant i correspond au numéro du point de la grille et non à une puissance.

c) Calculer les valeurs des trois paramètres, $p^i(h)$, $e^i(h)$ et $T^i_m(h)$ aux quatre points de la grille et à l'altitude h de la manière suivante:

$$T^i_m(h) = T^i_m(h^i_{ref}) - \alpha^i_m \cdot (h - h^i_{ref}) \quad \text{K} \tag{27b}$$

$$p^i(h) = p^i(h^i_{ref})\left[1-\frac{\alpha^i\cdot(h-h^i_{ref})}{T^i\left(h^i_{ref}\right)}\right]^{\frac{g^i}{R'_d\alpha^i}} \quad \text{hPa} \tag{27c}$$

$$e^i(h) = e^i\left(h^i_{ref}\right)\cdot\left[\frac{p^i(h)}{p^i\left(h^i_{ref}\right)}\right]^{\lambda^i+1} \quad \text{hPa} \tag{27d}$$

$$T^i\left(h^i_{ref}\right)=\frac{T^i_m(h^i_{ref})}{\left[1-\frac{\alpha^i R'_d}{(\lambda^i+1)g^i}\right]} \quad \text{K} \tag{27e}$$

$$\alpha^i = 0{,}5\cdot\left[\frac{\left(\lambda^i+1\right)\cdot g^i}{R'_d}-\sqrt{\frac{\left(\lambda^i+1\right)\cdot g^i}{R'_d}\left[\frac{\left(\lambda^i+1\right)\cdot g^i}{R'_d}-4\alpha^i_m\right]}\right] \quad \text{K/km} \tag{27f}$$

$$g^i = 9{,}806\cdot\left(1-0{,}002637\cdot\cos\left(2\cdot lat^i\right)-0{,}00031\cdot h^i_{ref}\right) \quad \text{m/s}^2 \tag{27g}$$

d) Calculer les valeurs de $\Delta L^i_{Hv}(h)$ et $\Delta L^i_{Wv}(h)$, aux quatre points de la grilleet à l'altitude h, à l'aide des formules (25a) et (25b), avec les valeurs de $p^i(h)$, $e^i(h)$ et $T^i_m(h)$ pour chaque point de la grille.

$$\Delta L^i_{Hv}(h) = 10^{-6}\frac{R_d}{g^i_m(h)}k_1\times p^i(h) \quad \text{m} \tag{27h}$$

$$\Delta L^i_{Wv}(h)=10^{-6}\frac{R_d}{g^i_m(h)}\frac{k_2}{(\lambda^i+1)}\cdot\frac{e^i(h)}{T^i_m(h)} \quad \text{m} \tag{27i}$$

où:

$$g^i_m(h) = 9{,}784\cdot(1-0{,}00266\cdot\cos(2\cdot lat^i)-0{,}00028\cdot h) \quad \text{m/s}^2 \tag{27j}$$

e) Calculer les valeurs de $\Delta L_{Hv}(h)$ et $\Delta L_{Wv}(h)$, à l'altitude h et à l'emplacement voulu, par interpolation bilinéaire des quatre valeurs de $\Delta L^i_{Hv}(h)$ et $\Delta L^i_{Wv}(h)$, aux quatre points de la grille, comme décrit dans la Recommandation UIT-R P.1144.

f) Calculer la valeur de la différence de longueur du trajet due aux effets troposphériques pour l'angle d'élévation θ, à l'altitude h et à l'emplacement voulu ($\Delta L(h,\theta)$), à l'aide de la formule (24).

On a testé la précision du modèle proposé au moyen de mesures radiométriques et de mesures effectuées par radiosonde ou par des systèmes GNSS, afin de déterminer la valeur de ΔL_{vs}, et l'incertitude se situe entre 2 et 6 cm dans le monde. Pour obtenir une plus grande précision, on peut utiliser comme données à introduire dans le modèle d'autres mesures locales de la pression totale de l'air et de la pression de la vapeur d'eau.

Les fonctions de mappage des composantes hydrostatique et humide, $m_h(\theta)$ et $m_w(\theta)$, sont données par:

$$m_h(\theta)=m(\theta,a_h,b_h,c_h) \tag{28a}$$

$$m_w(\theta)=m(\theta,a_w,b_w,c_w) \tag{28b}$$

où:

$$m(\theta)=\frac{1+\left[\dfrac{a}{1+\left(\dfrac{b}{1+c}\right)}\right]}{\sin\theta+\left[\dfrac{a}{\sin\theta+\left(\dfrac{b}{\sin\theta+c}\right)}\right]}$$

$$b_h = 0{,}0029$$

$$b_w = 0{,}00146$$

$$c_w = 0{,}04391$$

$$c_h = c_1 + \left[\left(\cos\left(\frac{D_y - 28}{365{,}25}\cdot 2\pi + \psi\right)+1\right)\cdot\frac{c_{11}}{2} + c_{10}\right]\cdot\left[1-\cos(lat)\right] \tag{28c}$$

Hémisphère	c_1	c_{10}	c_{11}	ψ
Nord	0,062	0,001	0,005	0
Sud	0,062	0,002	0,007	π

$$a_h = 10^{-3}\left[A_{0h} + A_{1h}\cdot\cos\left(2\pi\cdot\frac{D_y}{365{,}25}\right) + B_{1h}\cdot\sin\left(2\pi\cdot\frac{D_y}{365{,}25}\right) + A_{2h}\cdot\cos\left(4\pi\cdot\frac{D_y}{365{,}25}\right) + B_{2h}\cdot\sin\left(4\pi\cdot\frac{D_y}{365{,}25}\right)\right] \tag{28d}$$

$$a_w = 10^{-3}\left[A_{0w} + A_{1w}\cdot\cos\left(2\pi\cdot\frac{D_y}{365{,}25}\right) + B_{1w}\cdot\sin\left(2\pi\cdot\frac{D_y}{365{,}25}\right) + A_{2w}\cdot\cos\left(4\pi\cdot\frac{D_y}{365{,}25}\right) + B_{2w}\cdot\sin\left(4\pi\cdot\frac{D_y}{365{,}25}\right)\right] \tag{28e}$$

Les coefficients A_{0h}, A_{1h}, A_{2h}, B_{1h}, B_{2h}, A_{0w}, A_{1w}, A_{2w}, B_{1w} et B_{2w} font partie intégrante de la présente Recommandation et sont fournis sous la forme de cartes numériques dans le fichier R-REC-P.834-9-201712-I!!ZIP-E. On peut calculer les valeurs des paramètres a_h et a_w à l'emplacement voulu par interpolation bilinéaire des quatre valeurs de ces coefficients aux quatre points de la grille, comme décrit dans la Recommandation UIT-R P.1144.

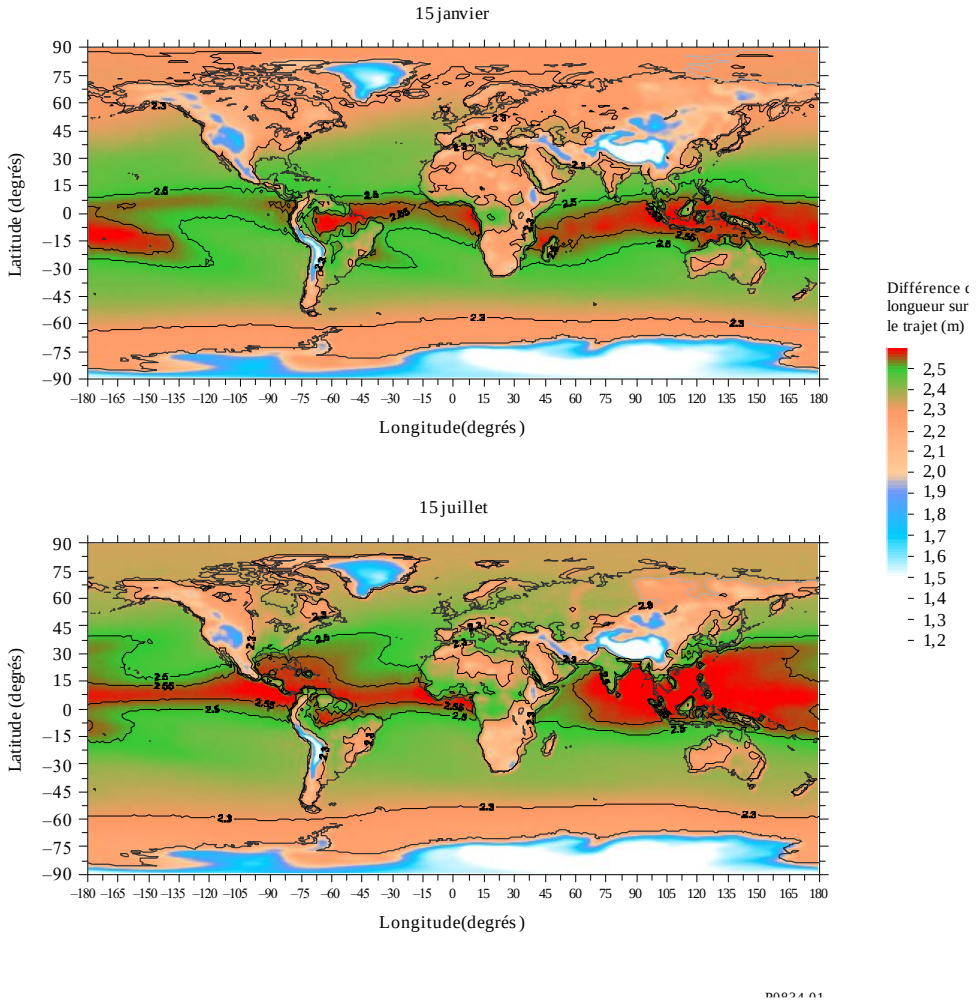
Dans le cas d'une liaison Terre-espace avec des angles d'élévation θ supérieurs à 20°, une approximation des fonctions de mappage définies par les formules (28a) et (28b) est donnée par:

$$m_h(\theta) = m_w(\theta) = \frac{1}{\sin(\theta)} \tag{28f}$$

Pour appliquer ce modèle, il est recommandé d'utiliser systématiquement pour tous les angles d'élévation, soit les formules (28a) et (28b), soit la formule (28f).

FIGURE 1

Cartes représentant la différence moyenne de temps de propagation sur le trajet au niveau de référence en janvier et en juillet



7 Propagation par conduits

Il y a conduits chaque fois que le gradient vertical du coïndice de réfraction à une altitude et un lieu donnés est inférieur à –157 N/km.

La présence de conduits est importante parce qu'ils peuvent donner lieu à une propagation radioélectrique anormale, en particulier sur des liaisons de Terre ou des liaisons Terre-espace avec un angle d'élévation très faible. Les conduits constituent un phénomène selon lequel des signaux radioélectriques de fréquence suffisamment élevée se propagent bien au-delà de leur distance de visibilité directe normale, d'où des risques de brouillage pour d'autres services (voir la Recommandation UIT-R P.452). Ils jouent par ailleurs un rôle important dans les phénomènes de brouillage par trajets multiples (voir la Recommandation UIT-R P.530) même si leur présence ne suffit pas ou n'est pas nécessaire pour que l'on observe des phénomènes de propagation par trajets multiples sur une liaison particulière.

7.1 Influence de l'angle d'élévation

Lorsqu'une antenne d'émission est située à l'intérieur d'un conduit radioélectrique à couches horizontales, les rayons émis à des angles d'élévation très faibles peuvent être «piégés» à l'intérieur du conduit. Dans le cas simplifié d'un profil de réfractivité «normal» au-dessus d'un conduit de surface ayant un gradient de réfractivité constant, l'angle d'élévation critique α (rad) pour que des rayons soient piégés est donné par l'expression:

$$\alpha = \sqrt{2 \times 10^{-6} \left| \frac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}h} \right| \Delta h} \tag{29}$$

où dM/dh est le gradient vertical du module de réfraction $\left(\frac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}h} < 0 \right)$ et Δh est l'épaisseur du conduit qui correspond à la hauteur du sommet du conduit au-dessus de l'antenne d'émission.

La Fig. 2 donne l'angle d'élévation maximal pour que des rayons soient piégés dans le conduit. L'angle de piégeage maximal augmente rapidement à mesure que les gradients de réfractivité passent en dessous de –157 N/km (c'est-à-dire lorsque les taux de variation augmentent) ou lorsque l'épaisseur du conduit augmente.

7.2 Fréquence de piégeage minimale

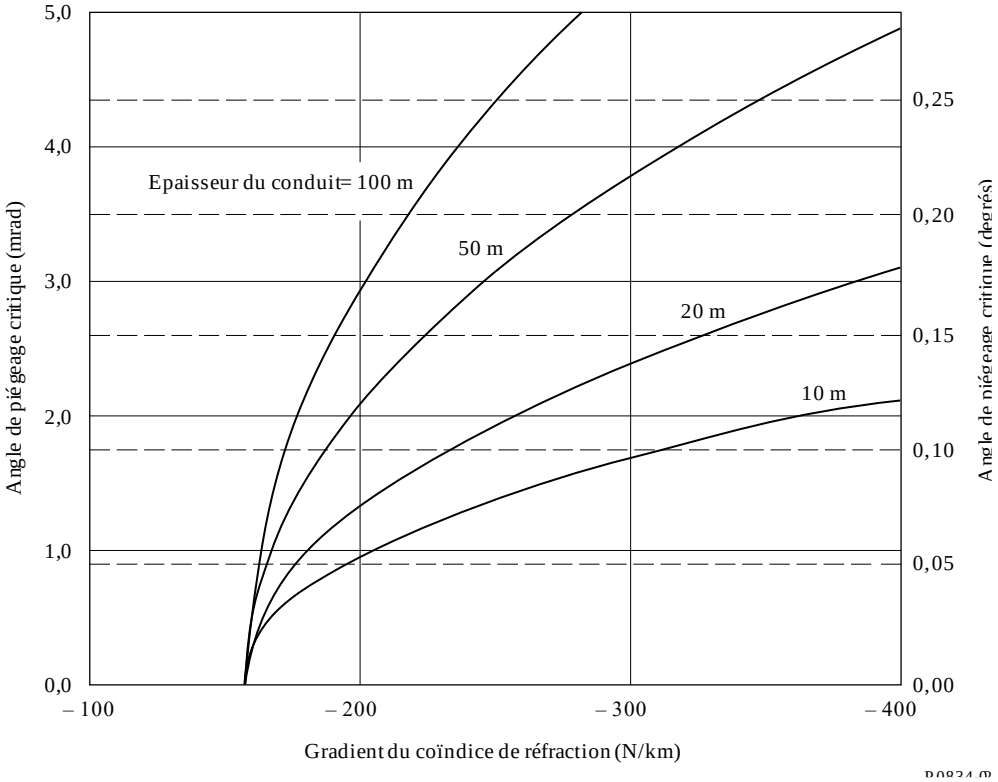
La présence d'un conduit même s'il est bien situé, ne signifie pas nécessairement que l'énergie sera efficacement couplée dans le conduit de façon à ce qu'il y ait propagation sur de longues distances. Outre le fait qu'elle doit respecter la condition d'un angle d'élévation maximal, la fréquence de l'onde doit être supérieure à une valeur critique déterminée par la profondeur physique du conduit et par le profil de réfractivité. En dessous de cette fréquence de piégeage minimale, il y aura fuites d'énergie à travers les parois du conduit.

Il est possible d'évaluer la fréquence minimale pour qu'une onde soit piégée dans un conduit troposphérique en utilisant une intégrale de phase. La Fig. 3 indique la fréquence de piégeage minimale pour des conduits de surface (courbes en traits pleins) où l'on suppose un gradient du coïndice de réfraction constant négatif entre la surface et une altitude donnée, avec un profil standard au-dessus de cette altitude. Pour les fréquences utilisées avec les systèmes de Terre (en général comprises entre 8 et 16 GHz) le conduit doit avoir une épaisseur minimale de 5 à 15 m environ et la fréquence de piégeage minimale, f_{min}, dépend fortement de l'épaisseur du conduit et du gradient de l'indice de réfraction.

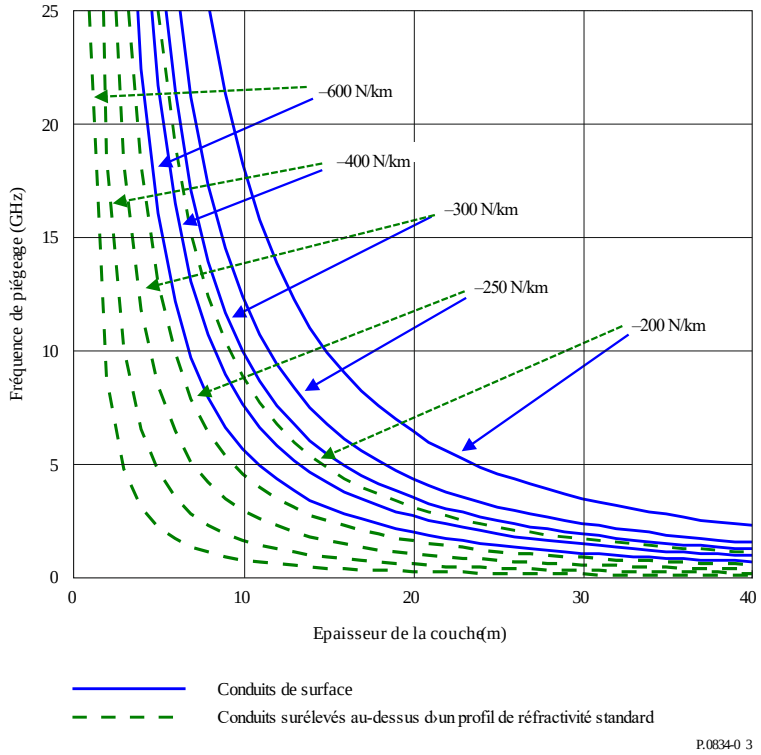
Dans le cas de conduits surélevés, un autre paramètre intervient, même pour le cas simple d'un profil linéaire du coïndice de réfraction. Ce paramètre tient compte de la forme du profil de l'indice de réfraction au-dessous du gradient du conduit. Les courbes en tirets de la Fig. 3 indiquent la fréquence de piégeage minimale pour un conduit à gradient constant situé au-dessus d'une couche de surface ayant un gradient du coïndice de réfraction standard d'au moins –40 N/km.

FIGURE 2

Angle maximal de piégeage pour un conduit de surface ayant un gradient du coïndice de réfraction constant au-dessus d'une Terre sphérique



Pour des couches ayant des taux de variation très légèrement supérieurs au minimum requis pour qu'il y ait propagation par conduit, la fréquence de piégeage minimale est en fait supérieure à celle que l'on observe dans le cas d'un conduit de surface. Pour tous les gradients de conduit, pour qu'il y ait piégeage dans un conduit surélevé, il faut une couche beaucoup plus fine que dans le cas d'un conduit de surface de gradient équivalent pour une fréquence donnée.

FIGURE 3

Fréquence minimale de piégeage dans des conduits radioélectriques atmosphériques pour des gradients du coïndice de réfraction constants