

RECOMMANDATION UIT-R P.834-3

**EFFETS DE LA RÉFRACTION TROPOSPHÉRIQUE SUR LA PROPAGATION
DES ONDES RADIOÉLECTRIQUES**

(Question UIT-R 201/3)

(1992-1994-1997-1999)

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

- 1 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:

$$\frac{1}{\rho} = - \frac{\cos \varphi}{n} \frac{dn}{dh} \quad (1)$$

où:

- ρ : rayon de courbure de la trajectoire du rayon
- n : indice de réfraction de l'atmosphère
- dn/dh : 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:

$$\frac{1}{\rho} = - \frac{dn}{dh} \quad (2)$$

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:

$$\frac{1}{ka} = \frac{1}{a} + \frac{dn}{dh} = \frac{1}{R_e} \quad (3)$$

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:

$$M = N + \frac{h}{a} \quad (4)$$

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:

$$\tau = - \int_h^\infty \frac{n'(x)}{n(x) \cdot \operatorname{tg}\varphi} dx \quad (5)$$

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

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

$$c = (r + h) \cdot n(h) \cdot \cos \theta \quad (7)$$

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:

$$n(x) = 1 + a \cdot \exp(-bx) \quad (8)$$

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 $\tau(h, \theta)$ (degrés) ont été évaluées dans l'hypothèse de l'atmosphère de référence; la formule numérique suivante semble donner une bonne approximation:

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

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

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

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

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

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:

$$\theta_m - \tau(h, \theta_m) \leq \theta_0 \quad (11)$$

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:

$$\theta - \tau(h, \theta) = \theta_0 \quad (12)$$

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

$$\theta = \theta_0 + \tau_s(h, \theta_0) \quad (13)$$

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):

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

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, $\Delta\theta$ (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 $\Delta\theta$ (pour les colonnes 1 et 4 seulement)				
1	0,1		valeur quadratique moyenne	
10	0,007		valeur quadratique moyenne	

5 Etalement du faisceau sur des trajets obliques

L'affaiblissement du signal peut aussi résulter de l'étalement supplémentaire du faisceau de l'antenne causé par la variation de la réfraction atmosphérique en fonction de l'angle d'élévation. Ce phénomène devrait être négligeable dès que l'angle d'élévation dépasse 3°. La Fig. 1 illustre les pertes dues aux effets de réfraction atmosphérique, à travers l'atmosphère tout entière. Les pertes devraient être indépendantes de la fréquence dans la gamme de 1 à 100 GHz où la vapeur d'eau est un des facteurs du profil de réfraction.

6 Longueur effective du trajet radioélectrique et variations de cette longueur

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:

$$\Delta L = \int_A^B (n - 1) ds \quad (15)$$

où:

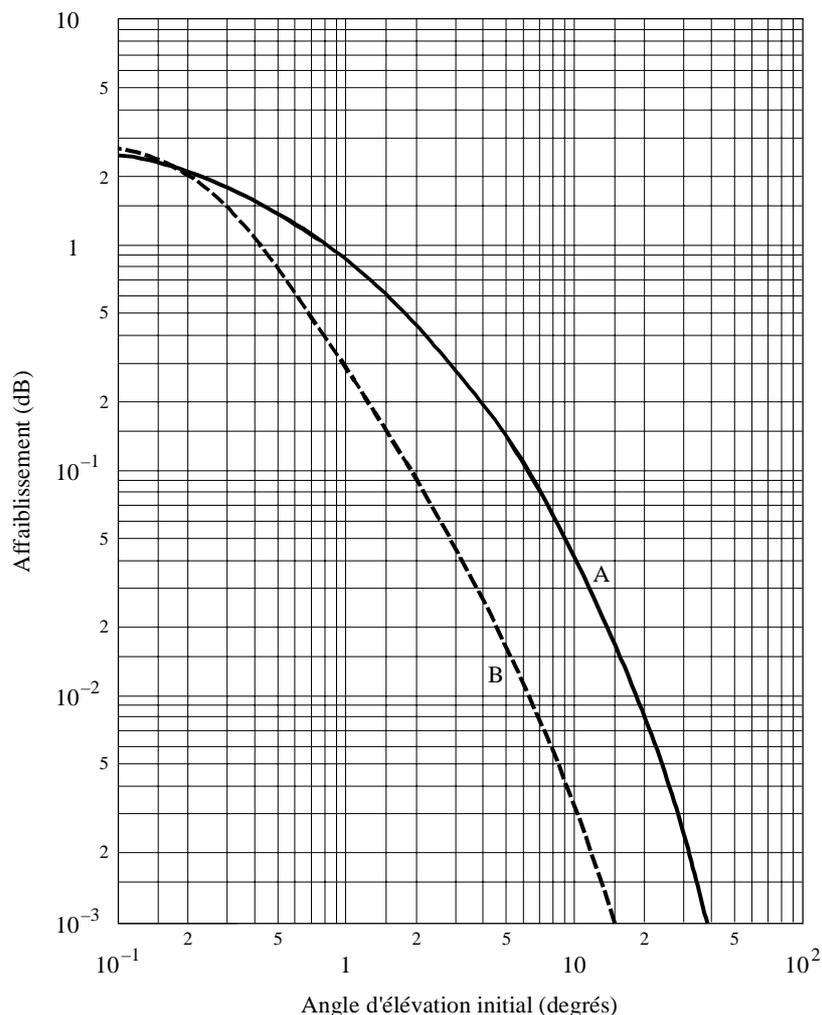
s : abscisse curviligne le long du trajet

n : indice de réfraction

A et B : extrémités du trajet.

On ne peut utiliser l'équation (15) que si la variation de l'indice de réfraction n le long du trajet est connue.

FIGURE 1
**Ordre de grandeur de l'affaiblissement
 dû à l'étalement supplémentaire du faisceau, et écart type
 de part et d'autre de la moyenne**



Courbes A: affaiblissement moyen
 B: écart type

0834-01

Lorsque la température T , la pression atmosphérique P et l'humidité relative H au niveau du sol sont connues, on calculera la différence de longueur de trajet ΔL selon la méthode semi-empirique expliquée ci-après, méthode qui a été élaborée à partir de 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:

$$\Delta L = \frac{\Delta L_V}{\sin \varphi_0 (1 + k \cotg^2 \varphi_0)^{1/2}} + \delta(\varphi_0, \Delta L_V) \tag{16}$$

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:

$$\Delta L_V = 0,00227 P + f(T) H \quad (17)$$

Dans le premier terme de la partie droite de l'équation (17), 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:

$$f(T) = a 10^{bT} \quad (18)$$

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 (16), on suppose une variation exponentielle du coïndice de réfraction atmosphérique N en fonction de l'altitude h :

$$N(h) = N_s \exp(-h / h_0) \quad (19)$$

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:

$$h_0 = 10^6 \frac{\Delta L_V}{N_s} \quad (20)$$

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

$$k = 1 - \left[\frac{n_s r_s}{n(h_0) r(h_0)} \right]^2 \quad (21)$$

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 (20)) et r_s et $r(h_0)$ sont les distances correspondantes par rapport au centre de la Terre.

Pour les trajets Terre vers satellite avec un angle d'élévation θ supérieur à 10°, on peut exprimer la différence de longueur due aux effets troposphériques (m) comme la somme d'un «terme sec» et d'un «terme humide»:

$$\Delta L = \Delta L_{sec} + \Delta L_{hum} = 0,00227 P + \frac{1,79 V}{T \sin \theta} \quad \text{m} \quad (22)$$

où P est la pression totale (hPa), T la température (K) au niveau du sol, θ l'angle d'élévation et V (kg/m² ou, de manière équivalente, mm d'eau précipitable) le contenu total d'une colonne d'air en vapeur d'eau.

ΔL varie de 2,2 à 2,7 m, au niveau de la mer, dans la direction du zénith. C'est de loin le terme ΔL_{sec} qui apporte la contribution la plus importante, environ 2,4 m. Le terme ΔL_{hum} , compris entre 0,05 et 0,6 m, est proportionnel au contenu total en vapeur d'eau le long du trajet dans l'atmosphère et est très variable.

Des statistiques de V sont données dans la Recommandation UIT-R P.836. Dans la même Recommandation, on indique comment extraire le contenu total en vapeur d'eau atmosphérique le long du trajet considéré à partir de mesures radiométriques. En pareil cas, la valeur $V/\sin \theta$ est obtenue directement. On parvient à une précision d'environ 1 cm lorsqu'on évalue ΔL au moyen de valeurs du contenu total en vapeur d'eau extraites à partir de mesures radiométriques.

Les valeurs de la différence de longueur de trajet ΔL due à l'atmosphère terrestre, nuages compris, ont été calculées pour 353 points dans le monde à partir de données recueillies par radiosonde sur une période de 10 ans (1980-1989). La Fig. 2 présente une carte du monde établie d'après ces données, où figurent les contours de la différence de longueur de trajet dépassée pendant 1% de l'année.

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:

$$\alpha = \sqrt{2 \times 10^{-6} \left| \frac{dM}{dh} \right| \Delta h} \quad (23)$$

où dM/dh est le gradient vertical du module de réfraction ($\frac{dM}{dh} < 0$) 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. 3 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.

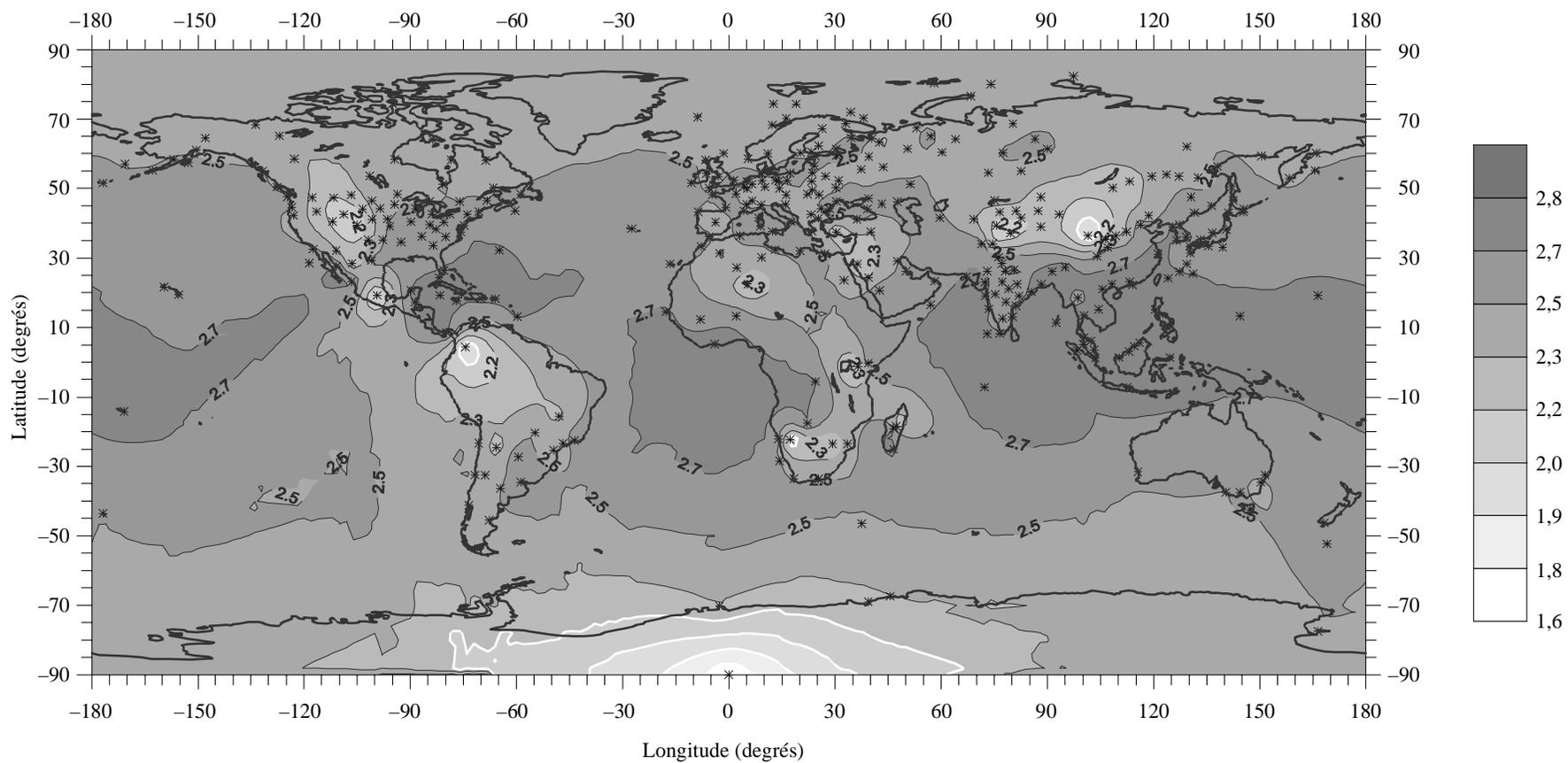
7.2 Fréquence de piégeage minimale

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. 4 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.

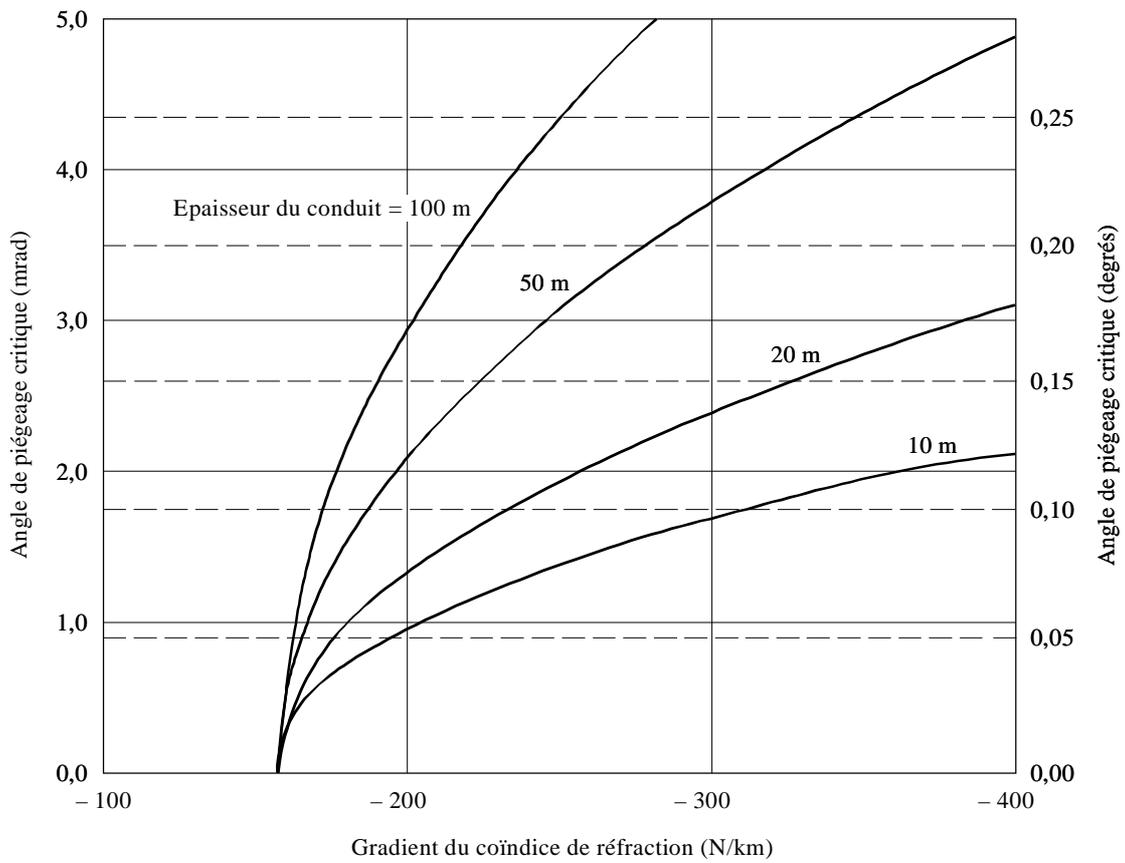
Dans le cas de conduits surélevés, un autre paramètre intervient, même pour le cas simple d'un profil linéaire du coïndice de réfraction. Ce paramètre tient compte de la forme du profil de l'indice de réfraction au-dessous du gradient du conduit. Les courbes en tirets de la Fig. 4 indiquent la fréquence 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
Contours de la différence de longueur de trajet (m) dépassée pendant 1% de l'année
(Les astérisques représentent les points de mesure)



0834-02

FIGURE 3
Angle maximal de piégeage pour un conduit de surface ayant un gradient du coïndice de réfraction constant au-dessus d'une Terre sphérique

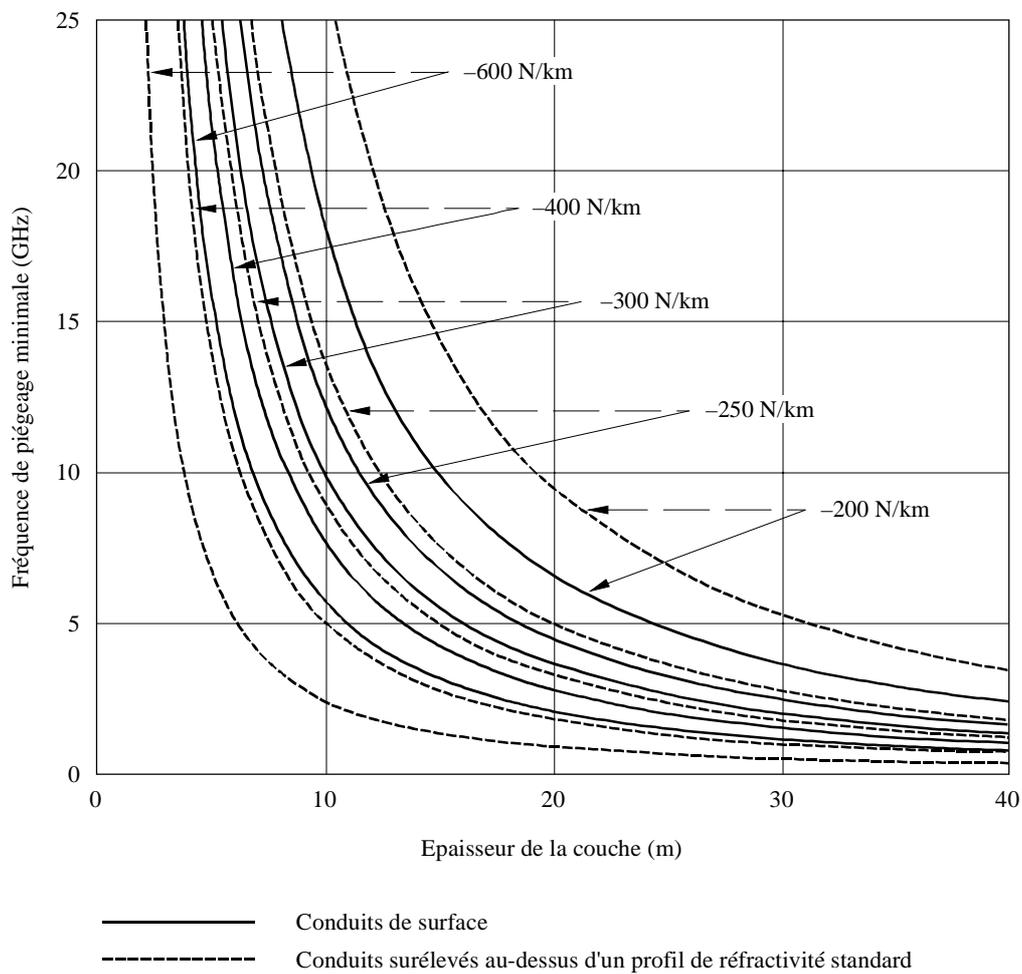


0834-03

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 des gradients de conduit très importants, 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 4

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



0834-04