

RECOMMANDATION UIT-R P.526-10*

Propagation par diffraction

(Question UIT-R 202/3)

(1978-1982-1992-1994-1995-1997-1999-2001-2003-2005-2007)

Domaine de compétence

La présente Recommandation contient plusieurs modèles permettant au lecteur d'évaluer les effets de la diffraction sur le champ reçu. Ces modèles peuvent être appliqués à différents types d'obstacles et à différentes géométries du trajet.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

a) qu'il est nécessaire de fournir des renseignements d'ingénierie pour le calcul du champ sur des trajets avec diffraction,

recommande

1 que les méthodes décrites dans l'Annexe 1 soient utilisées pour le calcul du champ sur des trajets avec diffraction, lesquels peuvent comporter une surface terrestre sphérique ou un terrain irrégulier qui comprend éventuellement différentes sortes d'obstacles.

Annexe 1**1 Introduction**

Bien que la diffraction soit produite seulement par la surface du sol ou par d'autres obstacles, on doit tenir compte de la réfraction moyenne de l'atmosphère le long du trajet pour évaluer ses caractéristiques géométriques dans son plan vertical (angle de diffraction, rayon de courbure, hauteur d'obstacle). A cet effet, le profil du terrain doit être tracé avec le rayon terrestre équivalent convenable (Recommandation UIT-R P.834). En l'absence d'autres indications, on peut tabler sur un rayon terrestre équivalent de 8 500 km.

2 Notions de base

La diffraction des ondes radioélectriques sur la surface de la Terre est affectée par les irrégularités du relief. Aussi, avant d'aller plus loin dans les méthodes de prévision pour ce mécanisme de propagation, quelques notions de base sont expliquées dans les paragraphes qui suivent.

* *Note du Secrétariat du BR* – Des modifications éditoriales ont été apportées à cette Recommandation en avril 2007.

2.1 Ellipsoïdes et zones de Fresnel

L'étude de la propagation des ondes radioélectriques entre deux points A et B conduit à subdiviser l'espace par une famille d'ellipsoïdes, appelés ellipsoïdes de Fresnel, ayant tous comme foyers les points A et B, tels qu'un point quelconque M d'un de ces ellipsoïdes satisfait la relation:

$$AM + MB = AB + n \frac{\lambda}{2} \quad (1)$$

dans laquelle n est un nombre entier qui caractérise l'ellipsoïde considéré ($n = 1$ correspond au premier ellipsoïde de Fresnel, etc.) et λ est la longueur d'onde.

Comme règle pratique, on considère que la propagation est en visibilité directe (LoS), c'est-à-dire avec des phénomènes de diffraction négligeables, s'il n'y a aucun obstacle à l'intérieur du premier ellipsoïde de Fresnel.

Une approximation du rayon d'un ellipsoïde, en un point situé entre l'émetteur et le récepteur en unités cohérentes, peut être donnée par la formule suivante:

$$R_n = \left[\frac{n \lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2} \right]^{1/2} \quad (2)$$

soit, en unités pratiques:

$$R_n = 550 \left[\frac{n d_1 d_2}{(d_1 + d_2) f} \right]^{1/2} \quad (3)$$

dans laquelle f est la fréquence (MHz), d_1 et d_2 sont les distances (km) de l'émetteur et du récepteur au point où l'on calcule le rayon de l'ellipsoïde (m).

Pour certains problèmes, on est amené à considérer des zones de Fresnel qui sont les zones obtenues en prenant l'intersection d'une famille d'ellipsoïdes par un plan. La zone d'ordre n est la partie comprise entre les courbes obtenues avec les ellipsoïdes n et $n - 1$ respectivement.

2.2 Largeur de la pénombre

La transition entre la lumière et l'ombre définit la région de la pénombre. Ce passage se fait le long d'une bande étroite (largeur de la pénombre) à la limite de l'ombre géométrique. La Fig. 1 montre la largeur de la pénombre (W) dans le cas d'un émetteur situé à une hauteur h au-dessus d'une Terre sphérique régulière de:

$$w = \left[\frac{\lambda a_e^2}{\pi} \right]^{1/3} \quad \text{m} \quad (4)$$

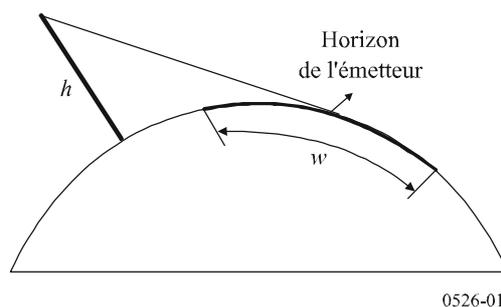
où

λ : longueur d'onde (m)

a_e : rayon équivalent de la Terre (m).

FIGURE 1

Définition de la largeur de la pénombre



2.3 Zone de diffraction

La zone de diffraction d'un émetteur s'étend de la distance en LoS où le dégagement du terrain est égal à 60% du rayon de la première zone de Fresnel, R_1 , jusqu'à une distance bien au-delà de l'horizon de l'émetteur où le mécanisme de diffusion troposphérique devient prédominant.

2.4 Critère de régularité de la surface des obstacles

Si la surface de l'obstacle a des irrégularités ne dépassant pas Δh ,

où:

$$\Delta h = 0,04 [R\lambda^2]^{1/3} \quad \text{m} \quad (5)$$

où:

R : rayon de courbure de l'obstacle (m)

λ : longueur d'onde (m)

alors l'obstacle peut être considéré comme régulier et on peut utiliser les méthodes décrites aux § 3 et 4.2 pour calculer l'affaiblissement.

2.5 Obstacle isolé

Un obstacle peut être considéré comme isolé s'il n'y a pas d'interaction entre l'obstacle proprement dit et le terrain environnant. En d'autres termes, l'affaiblissement sur le trajet est uniquement dû à l'obstacle, sans aucune contribution du relief. Les conditions ci-après doivent être remplies:

- pas de chevauchement entre les largeurs de la pénombre associées à chaque terminal et le sommet de l'obstacle;
- le dégagement du trajet de part et d'autre des obstacles devrait être égal au moins à 0,6 du rayon de la première zone de Fresnel;
- aucune réflexion spéculaire de part et d'autre de l'obstacle.

2.6 Types de terrain

Selon la valeur numérique du paramètre Δh (voir la Recommandation UIT-R P.310) utilisée pour définir le degré d'irrégularité du terrain, on distingue trois types de terrain:

a) Terrain régulier

La surface de la Terre peut être considérée comme régulière si les irrégularités du terrain sont de l'ordre de $0,1R$, ou inférieures à cette valeur, où R est la valeur maximale du rayon de la première zone de Fresnel sur le trajet de propagation. Dans ce cas, le modèle de prévision est basé sur la diffraction sur une Terre sphérique (voir le § 3).

b) Obstacles isolés

Le profil du terrain du trajet de propagation se compose d'un ou de plusieurs obstacles isolés. Dans ce cas, selon la schématisation retenue pour caractériser les obstacles rencontrés sur le trajet de propagation, il convient d'utiliser les modèles de prévision décrits au § 4.

c) Terrain vallonné

Le profil se compose de plusieurs petits monts dont aucun ne constitue un obstacle important. Dans cette gamme de fréquences, la Recommandation UIT-R P.1546 convient pour la prévision du champ mais ne constitue pas une méthode de diffraction.

2.7 Intégrales de Fresnel

L'intégrale complexe de Fresnel est donnée par la formule:

$$F_c(v) = \int_0^v \exp\left(j \frac{\pi s^2}{2}\right) ds = C(v) + jS(v) \quad (6)$$

où j est l'opérateur complexe égal à $\sqrt{-1}$ et $C(v)$ et $S(v)$ sont les intégrales de Fresnel en cosinus et en sinus définies par:

$$C(v) = \int_0^v \cos\left(\frac{\pi s^2}{2}\right) ds \quad (7a)$$

$$S(v) = \int_0^v \sin\left(\frac{\pi s^2}{2}\right) ds \quad (7b)$$

L'intégrale complexe de Fresnel $F_c(v)$ peut être évaluée par intégration numérique ou, avec une précision suffisante pour la plupart des besoins, pour v positif en utilisant:

$$F_c(v) = \exp(jx) \sqrt{\frac{x}{4}} \sum_{n=0}^{11} \left[(a_n - jb_n) \left(\frac{x}{4}\right)^n \right] \quad \text{pour } 0 \leq x < 4 \quad (8a)$$

$$F_c(v) = \left(\frac{1+j}{2}\right) + \exp(jx) \sqrt{\frac{4}{x}} \sum_{n=0}^{11} \left[(c_n - jd_n) \left(\frac{4}{x}\right)^n \right] \quad \text{pour } x \geq 4 \quad (8b)$$

où:

$$x = 0,5 \pi v^2 \quad (9)$$

et a_n, b_n, c_n et d_n sont les coefficients de Boersma donnés ci-après:

$a_0 = +1,595769140$	$b_0 = -0,000000033$	$c_0 = +0,000000000$	$d_0 = +0,199471140$
$a_1 = -0,000001702$	$b_1 = +4,255387524$	$c_1 = -0,024933975$	$d_1 = +0,000000023$
$a_2 = -6,808568854$	$b_2 = -0,000092810$	$c_2 = +0,000003936$	$d_2 = -0,009351341$
$a_3 = -0,000576361$	$b_3 = -7,780020400$	$c_3 = +0,005770956$	$d_3 = +0,000023006$
$a_4 = +6,920691902$	$b_4 = -0,009520895$	$c_4 = +0,000689892$	$d_4 = +0,004851466$
$a_5 = -0,016898657$	$b_5 = +5,075161298$	$c_5 = -0,009497136$	$d_5 = +0,001903218$
$a_6 = -3,050485660$	$b_6 = -0,138341947$	$c_6 = +0,011948809$	$d_6 = -0,017122914$
$a_7 = -0,075752419$	$b_7 = -1,363729124$	$c_7 = -0,006748873$	$d_7 = +0,029064067$
$a_8 = +0,850663781$	$b_8 = -0,403349276$	$c_8 = +0,000246420$	$d_8 = -0,027928955$
$a_9 = -0,025639041$	$b_9 = +0,702222016$	$c_9 = +0,002102967$	$d_9 = +0,016497308$
$a_{10} = -0,150230960$	$b_{10} = -0,216195929$	$c_{10} = -0,001217930$	$d_{10} = -0,005598515$
$a_{11} = +0,034404779$	$b_{11} = +0,019547031$	$c_{11} = +0,000233939$	$d_{11} = +0,000838386$

$C(v)$ et $S(v)$ peuvent être évalués pour des valeurs négatives de v en notant que:

$$C(-v) = -C(v) \quad (10a)$$

$$S(-v) = -S(v) \quad (10b)$$

3 Diffraction sur une Terre sphérique

On peut calculer l'affaiblissement de transmission supplémentaire dû à la diffraction sur une Terre sphérique au moyen de la formule classique de la série des résidus. Un logiciel de calcul GRWAVE, disponible auprès de l'UIT, utilise la méthode complète. La Recommandation UIT-R P.368 contient un sous-ensemble des résultats de ce programme (pour les antennes proches du sol et à des fréquences inférieures).

3.1 Affaiblissement de diffraction pour des trajets au-delà de l'horizon

A de grandes distances au-delà de l'horizon, seul le premier terme de la série des résidus est important. Même à proximité de l'horizon ou au niveau de l'horizon on peut utiliser cette approximation avec une erreur maximale d'environ 2 dB dans la plupart des cas.

Ce premier terme peut être écrit sous forme du produit d'un terme dépendant de la distance, F , et de deux termes dépendant du gain dû à la hauteur, G_T et G_R . Les § 3.1.1 et 3.1.2 indiquent comment ces termes peuvent être déduits de formules simples ou de nomogrammes.

3.1.1 Calculs numériques

3.1.1.1 Influence des caractéristiques électriques de la surface de la Terre

On peut déterminer l'importance de l'influence des caractéristiques électriques de la surface de la Terre influant sur l'affaiblissement de diffraction en calculant un facteur normalisé d'admittance de surface, K , donné par les formules:

en unités cohérentes:

$$K_H = \left(\frac{2\pi a_e}{\lambda} \right)^{-1/3} \left[(\epsilon - 1)^2 + (60 \lambda \sigma)^2 \right]^{-1/4} \text{ pour la polarisation horizontale} \quad (11)$$

et

$$K_V = K_H \left[\epsilon^2 + (60 \lambda \sigma)^2 \right]^{1/2} \text{ pour la polarisation verticale} \quad (12)$$

ou, en unités pratiques:

$$K_H = 0,36 (a_e f)^{-1/3} \left[(\epsilon - 1)^2 + (18\,000 \sigma / f)^2 \right]^{-1/4} \quad (11a)$$

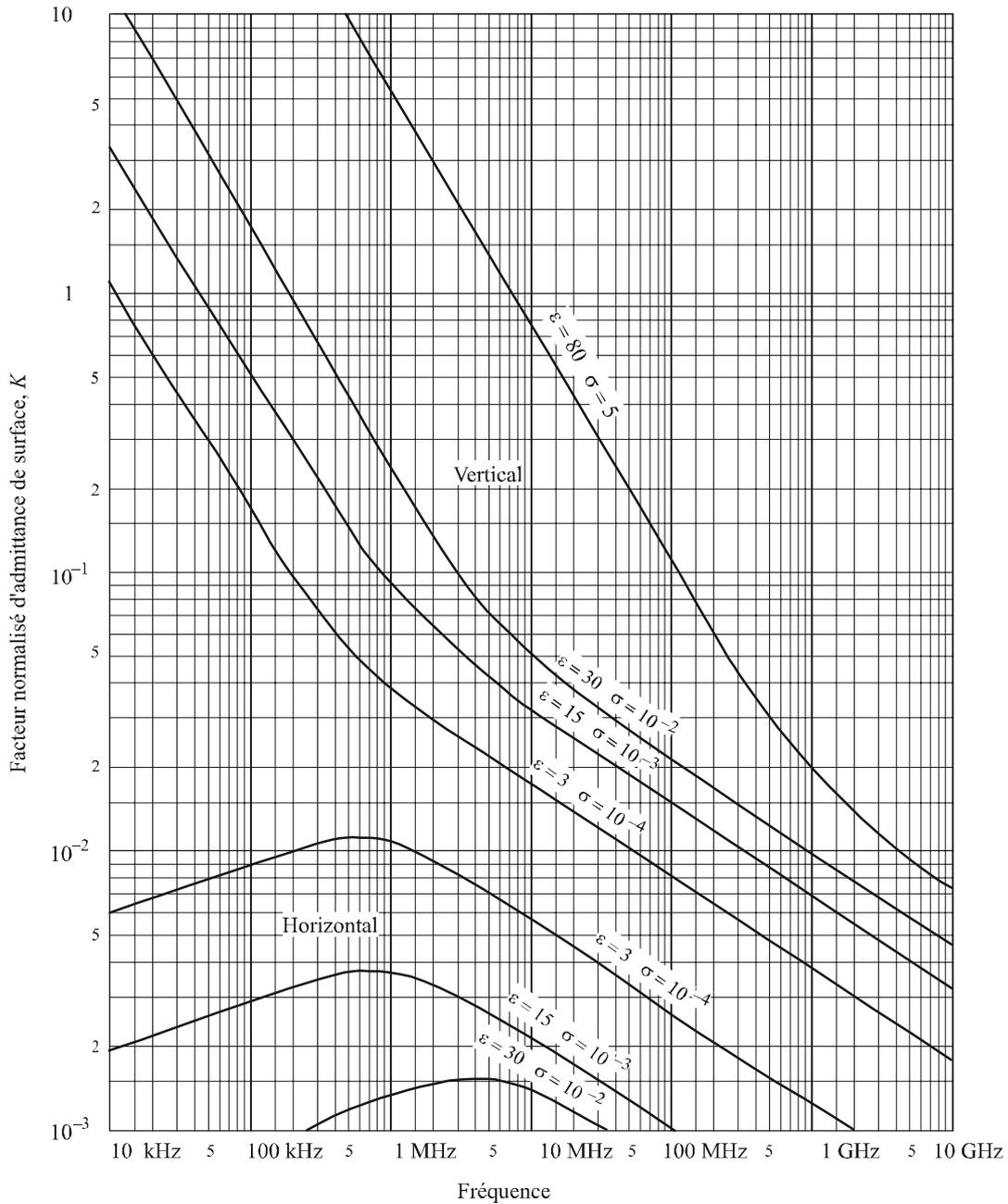
$$K_V = K_H \left[\epsilon^2 + (18\,000 \sigma / f)^2 \right]^{1/2} \quad (12a)$$

où:

- a_e : rayon terrestre équivalent (km)
- ϵ : permittivité relative équivalente
- σ : conductivité équivalente (S/m)
- f : fréquence (MHz).

Les valeurs caractéristiques de K sont indiquées à la Fig. 2.

FIGURE 2
Calcul de K



Si K est inférieur à 0,001, les caractéristiques électriques de la Terre sont sans influence. Si K est supérieur à 0,001, il convient d'utiliser les formules appropriées données ci-après.

3.1.1.2 Formules du champ de diffraction

Le champ de diffraction, E , par rapport au champ en espace libre, E_0 , est donné par la formule:

$$20 \log \frac{E}{E_0} = F(X) + G(Y_1) + G(Y_2) \quad \text{dB} \quad (13)$$

où X est la longueur normalisée du trajet entre les antennes situées à des hauteurs normalisées Y_1 et Y_2 (et où $20 \log \frac{E}{E_0}$ est en général négatif).

En unités cohérentes:

$$X = \beta \left(\frac{\pi}{\lambda a_e^2} \right)^{1/3} d \quad (14)$$

$$Y = 2\beta \left(\frac{\pi^2}{\lambda^2 a_e} \right)^{1/3} h \quad (15)$$

soit, en unités pratiques:

$$X = 2,2\beta f^{1/3} a_e^{-2/3} d \quad (14a)$$

$$Y = 9,6 \times 10^{-3} \beta f^{2/3} a_e^{-1/3} h \quad (15a)$$

où:

- d : longueur du trajet (km)
- a_e : rayon terrestre équivalent (km)
- h : hauteur d'antenne (m)
- f : fréquence (MHz).

β est un paramètre qui tient compte de la nature du sol et de la polarisation. Il est relié à K par la formule semi-empirique suivante:

$$\beta = \frac{1 + 1,6 K^2 + 0,75 K^4}{1 + 4,5 K^2 + 1,35 K^4} \quad (16)$$

En polarisation horizontale à toutes fréquences, et en polarisation verticale au-dessus de 20 MHz sur terre ou 300 MHz sur mer, β peut être pris égal à 1.

En polarisation verticale au-dessous de 20 MHz sur terre ou 300 MHz sur mer, on doit calculer β en fonction de K . Cependant, on peut alors négliger ε et écrire:

$$K^2 \approx 6,89 \frac{\sigma}{k^{2/3} f^{5/3}} \quad (16a)$$

σ étant exprimé en S/m, f (MHz) et k étant le facteur multiplicatif du rayon terrestre.

Le terme dépendant de la distance est donné par la formule:

$$F(X) = 11 + 10 \log(X) - 17,6 X \quad (17)$$

Le terme de gain de hauteur $G(Y)$ est donné par les formules suivantes:

$$G(Y) \cong 17,6(Y - 1,1)^{1/2} - 5 \log(Y - 1,1) - 8 \quad \text{pour } Y > 2 \quad (18)$$

Pour $Y < 2$, la valeur de $G(Y)$ est une fonction de la valeur de K calculée dans le § 3.1.1:

$$G(Y) \cong 20 \log(Y + 0,1 Y^3) \quad \text{pour } 10 K < Y < 2 \quad (18a)$$

$$G(Y) \cong 2 + 20 \log K + 9 \log(Y/K) [\log(Y/K) + 1] \quad \text{pour } K/10 < Y < 10 K \quad (18b)$$

$$G(Y) \cong 2 + 20 \log K \quad \text{pour } Y < K/10 \quad (18c)$$

3.1.2 Calcul nomographique

Dans les mêmes conditions d'approximation (prépondérance du premier terme de la série des résidus), on peut aussi faire le calcul par la formule suivante:

$$20 \log \frac{E}{E_0} = F(d) + H(h_1) + H(h_2) \quad \text{dB} \quad (19)$$

où:

E : champ à la réception

E_0 : champ en espace libre à la même distance

d : distance entre les extrémités de la liaison

h_1, h_2 : hauteurs des antennes au-dessus d'une terre sphérique.

Les fonctions F (influence de la distance) et H (gain de hauteur) sont représentées par des nomogrammes aux Fig. 3, 4, 5 et 6.

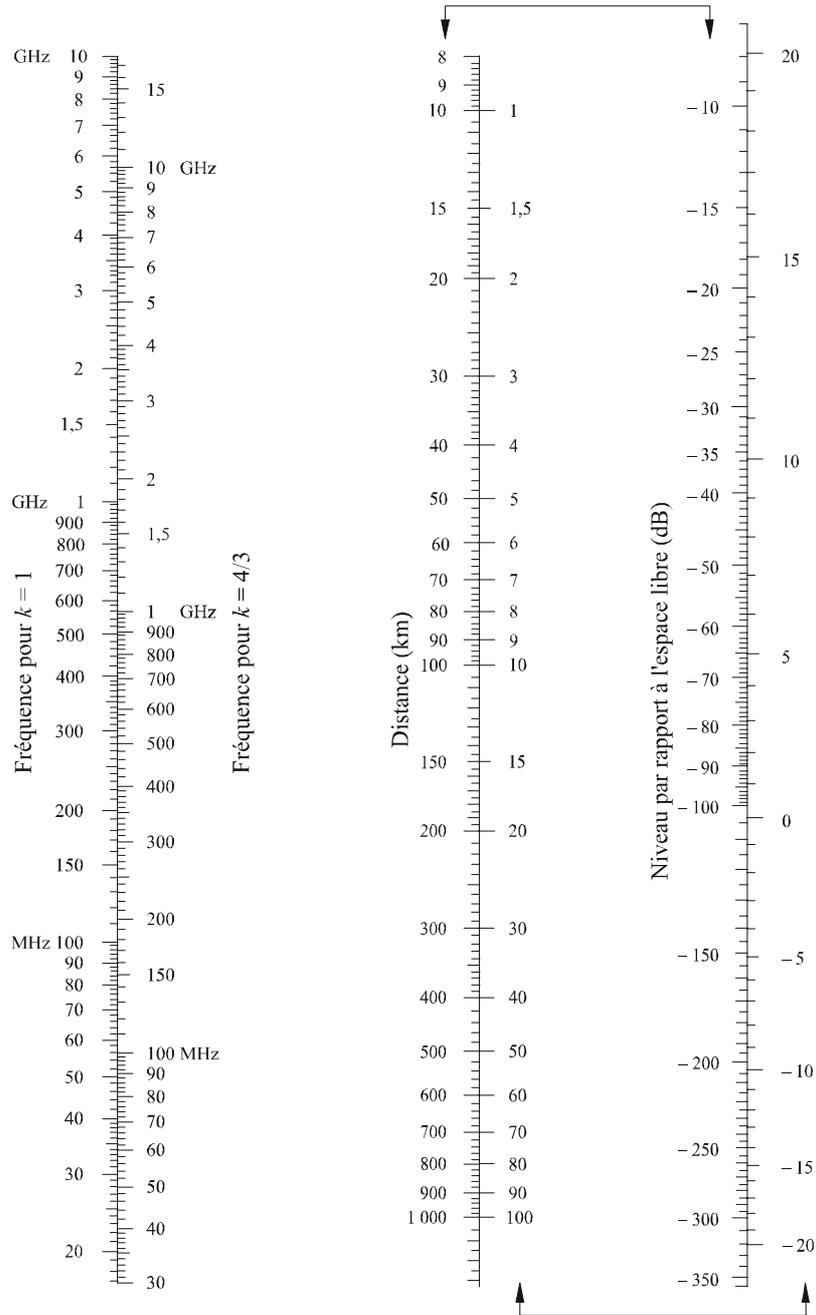
Ces nomogrammes (Fig. 3 à 6) donnent directement le niveau du signal reçu, par rapport au niveau en espace libre, pour $k = 1$, $k = 4/3$ et pour des fréquences supérieures à 30 MHz environ. k est le facteur multiplicatif du rayon terrestre défini dans la Recommandation UIT-R P.310. Cependant, on peut calculer le niveau reçu pour d'autres valeurs de k en utilisant l'échelle des fréquences pour $k = 1$, la fréquence considérée f étant remplacée par une fréquence fictive égale à f/k^2 pour les Fig. 3 et 5 et à f/\sqrt{k} , pour les Fig. 4 et 6.

Très près du sol, le champ est pratiquement indépendant de la hauteur. Ce phénomène est surtout important en polarisation verticale sur un trajet maritime. C'est pourquoi la Fig. 6 comporte un segment vertical AB en trait gras. Si la droite d'alignement coupait ce segment vertical limite AB, il faudrait remplacer la hauteur réelle par une hauteur fictive plus grande, de façon que la droite d'alignement passe juste par le point supérieur A.

NOTE 1 – Si l'on veut obtenir l'affaiblissement par rapport à la propagation en espace libre, il faut inverser le signe des valeurs données par la formule (19). Si la formule (19) donne une valeur supérieure au champ en espace libre, la méthode n'est pas valable.

FIGURE 3

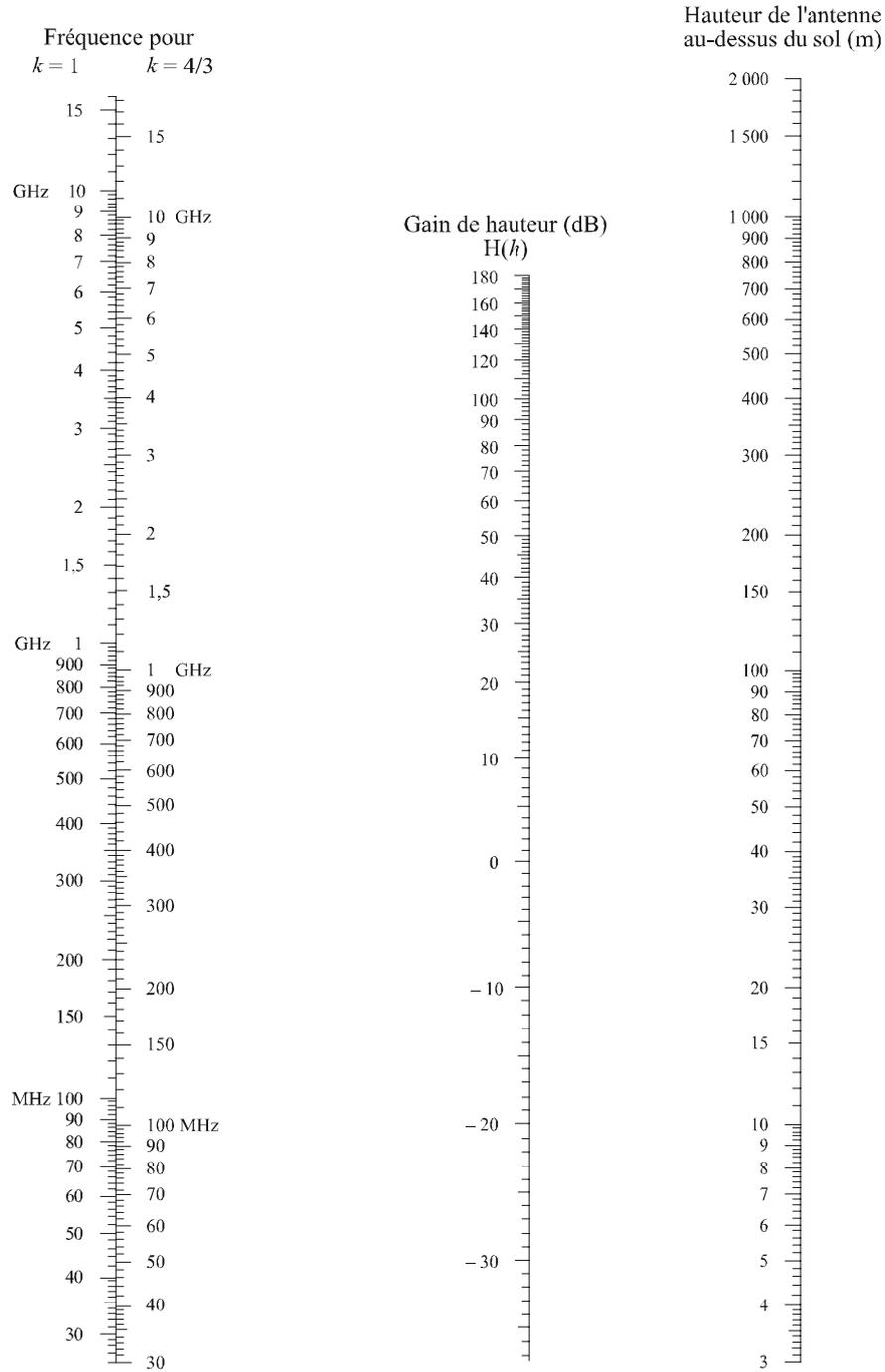
Diffraction sur une terre sphérique – Effet de la distance



Polarisation horizontale – trajet terrestre et maritime
 Polarisation verticale – trajet terrestre

(Les échelles reliées par des flèches doivent être utilisées conjointement)

FIGURE 4
 Diffraction sur une terre sphérique – Gain de hauteur

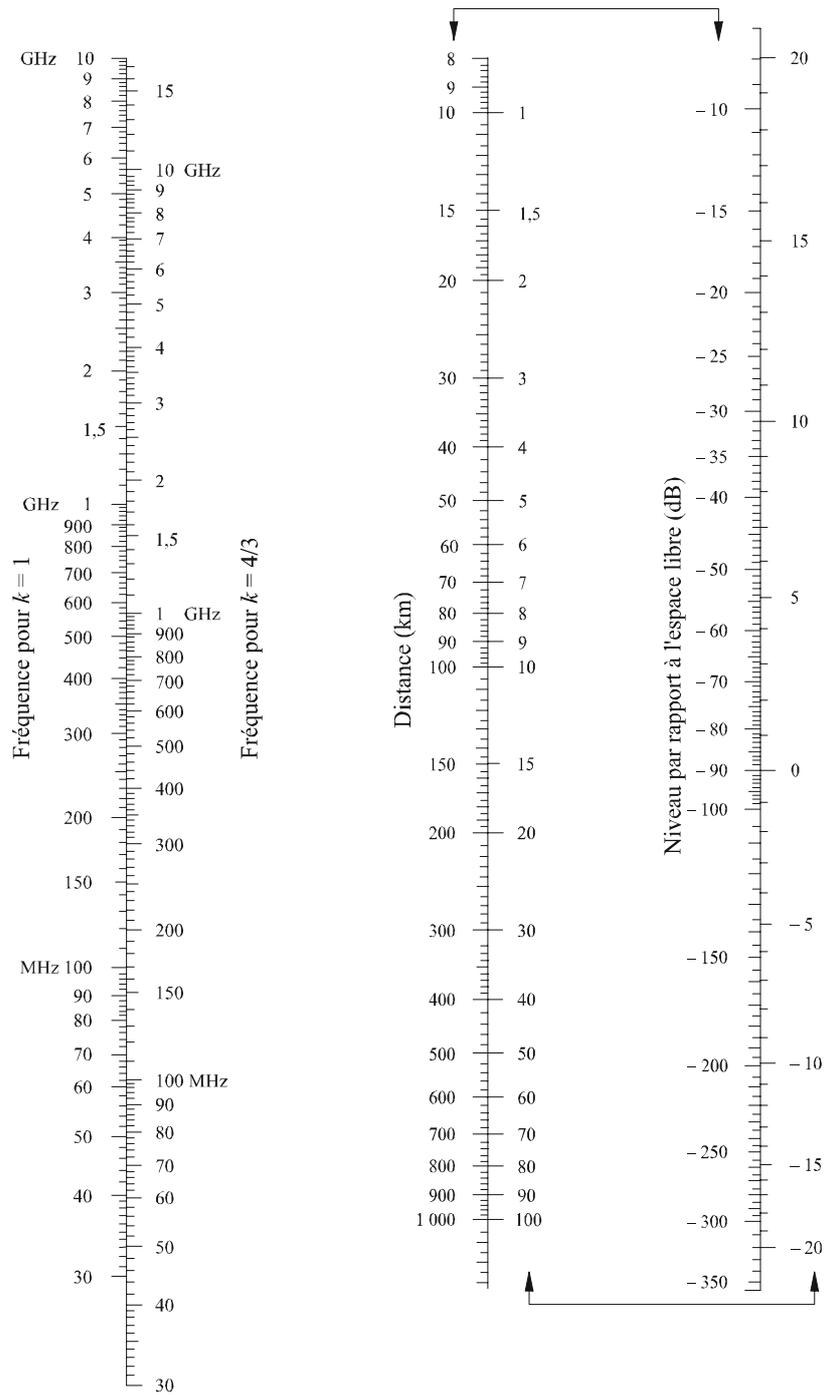


Polarisation horizontale – trajet terrestre et maritime
 Polarisation verticale – trajet terrestre

0526-04

FIGURE 5

Diffraction sur une terre sphérique – Effet de la distance

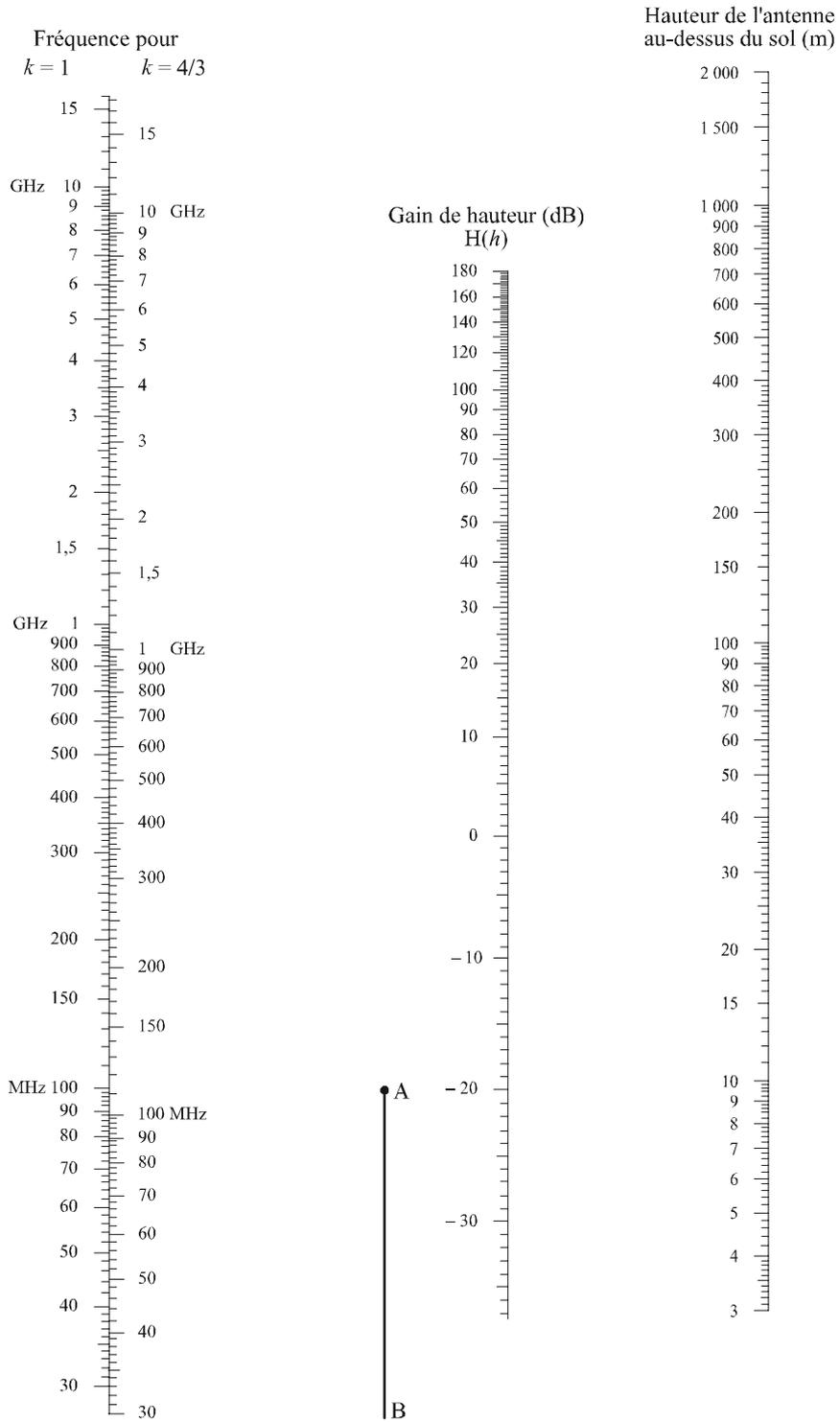


Polarisation verticale – trajet maritime

(Les échelles reliées par des flèches doivent être utilisées conjointement)

0526-05

FIGURE 6
 Diffraction sur une terre sphérique – Gain de hauteur



Polarisation verticale – trajet maritime

3.2 Affaiblissement de diffraction pour des trajets en visibilité directe avec diffraction sur les sous-trajets

Dans ce cas, étant donné que la convergence de la série des résidus nécessite le calcul de plusieurs termes, on peut utiliser une interpolation linéaire entre la limite de la zone de diffraction (dégagement égal à 0,6 du rayon de la première zone de Fresnel) où l'affaiblissement par rapport à l'espace libre est égal à zéro et l'horizon radioélectrique. Selon cette méthode, l'affaiblissement de diffraction est calculé en fonction du rayon de la première zone de Fresnel, R_1 , comme suit:

$$A(\text{dB}) = \left[1 - \frac{5}{3} \frac{h}{R_1} \right] A_h \quad (20)$$

où:

h : dégagement du trajet compris entre 0 et $0,6 R_1$

A_h : affaiblissement de diffraction au niveau de l'horizon (voir le § 3.1).

Le dégagement du trajet est donné par la formule suivante (voir la Fig. 7):

$$d_1 = \frac{d}{2}(1-b) \quad \text{si } (h_1 \leq h_2) \quad (21a-i)$$

où:

$$d_1 = \frac{d}{2}(1+b) \quad \text{dans les autres cas} \quad (21a-ii)$$

$$d_2 = d - d_1 \quad (21b)$$

$$b = 2\sqrt{\frac{m+1}{3m}} \cos \left\{ \frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \arccos \left(\frac{3c}{2} \sqrt{\frac{3m}{(m+1)^3}} \right) \right\} \quad (21c)$$

$$c = \frac{|h_1 - h_2|}{h_1 + h_2} \quad (21d)$$

$$m = \frac{d^2}{4a_e(h_1 + h_2)} \quad (21e)$$

$$R_1 = \sqrt{\frac{d_1 \cdot d_2 \cdot \lambda}{d}} \quad (21f)$$

A noter qu'il convient d'exprimer tous les paramètres ci-dessus en unités cohérentes.

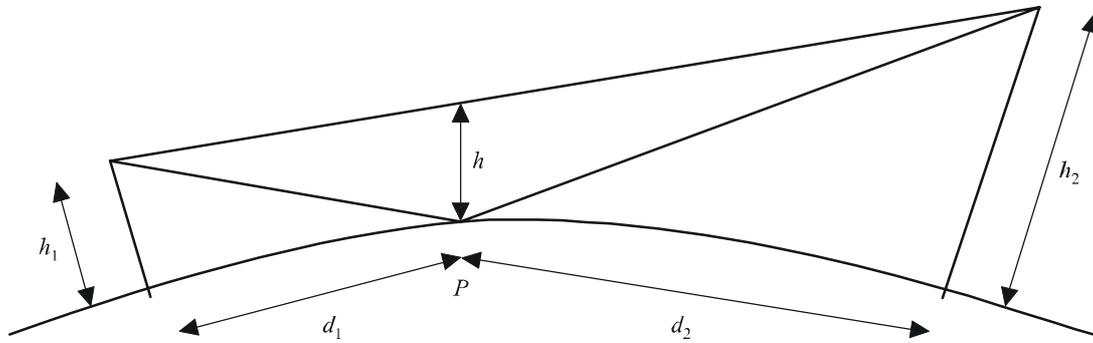
4 Diffraction par des obstacles isolés

De nombreux trajets de propagation comportent un ou plusieurs obstacles isolés, et il est intéressant d'estimer les affaiblissements introduits par ceux-ci. Pour les calculer, on est conduit à schématiser la forme des obstacles par une arête vive (en lame de couteau) ou par une arête arrondie et lisse, dont le rayon de courbure est bien défini. Il est bien certain que les obstacles réels ont des formes plus complexes, aussi les indications données dans la présente Recommandation doivent-elles être considérées seulement comme une approximation.

Dans les cas où la distance en ligne droite entre deux terminaux est beaucoup plus courte que le trajet de diffraction, il faut calculer l'affaiblissement de transmission supplémentaire dû à l'allongement du trajet.

On suppose ci-dessous que la longueur d'onde est assez petite par rapport à la taille des obstacles, c'est-à-dire qu'il s'agit principalement d'ondes métriques ou plus courtes ($f > 30$ MHz).

FIGURE 7
Dégagement du trajet



P: Point de réflexion

0526-07

4.1 Obstacle unique à arête en lame de couteau

Dans ce cas extrêmement schématisé (Fig. 8a) et 8b)), toutes les caractéristiques géométriques sont combinées en une seule grandeur scalaire sans dimension qu'on désigne habituellement par v et qui peut prendre diverses formes équivalentes, suivant les caractéristiques géométriques choisies:

$$v = h \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)} \quad (22)$$

$$v = \theta \sqrt{\frac{2}{\lambda \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)}} \quad (23)$$

$$v = \sqrt{\frac{2 h \theta}{\lambda}} \quad (v \text{ est du signe de } h \text{ et de } \theta) \quad (24)$$

$$v = \sqrt{\frac{2 d}{\lambda}} \cdot \alpha_1 \alpha_2 \quad (v \text{ est du signe de } \alpha_1 \text{ et de } \alpha_2) \quad (25)$$

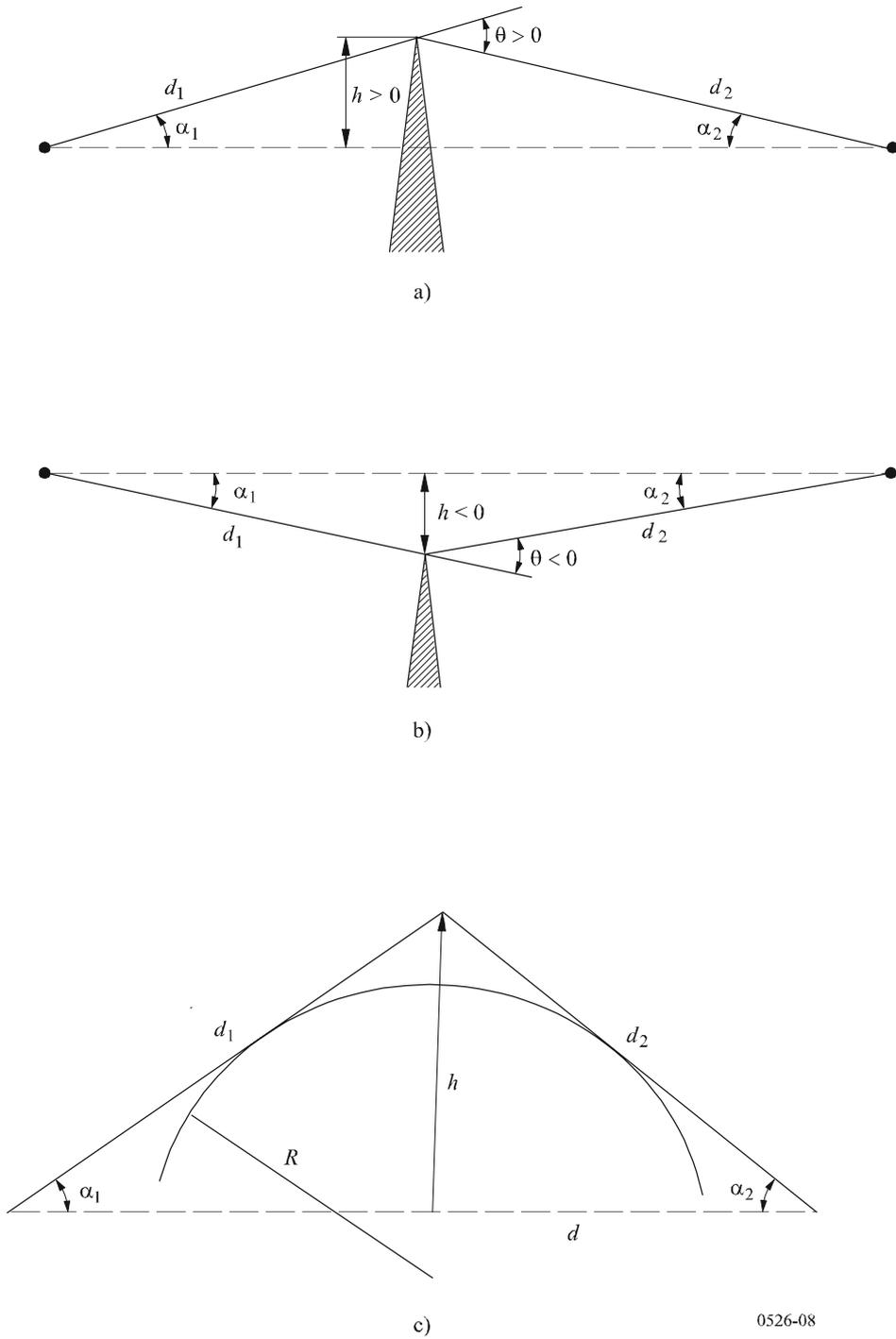
où:

- h : hauteur du sommet de l'arête au-dessus de la droite joignant les deux extrémités du trajet; si le sommet est au-dessous de cette ligne, h est négatif
- d_1, d_2 : distances des deux extrémités du trajet au sommet de l'arête
- d : longueur du trajet
- θ : angle de diffraction (rad); son signe est le même que celui de h ; l'angle θ est supposé inférieur à environ $0,2$ rad, soit approximativement 12°
- α_1, α_2 : angles séparant, à partir d'une extrémité, le sommet de l'arête et l'extrémité opposée; α_1 et α_2 sont du signe de h dans les relations ci-dessus.

NOTE 1 – Dans les relations (22) à (25), h, d, d_1, d_2 et λ sont exprimés en unités cohérentes.

FIGURE 8
Éléments géométriques

(Pour les définitions de θ , α_1 , α_2 , d , d_1 , d_2 et R , voir les § 4.1 et 4.2)



La Fig. 9 donne l'affaiblissement $J(v)$ (dB) en fonction de v .

$J(v)$ est donné par:

$$J(v) = -20 \log \left(\frac{\sqrt{[1 - C(v) - S(v)]^2 + [C(v) - S(v)]^2}}{2} \right) \quad (26)$$

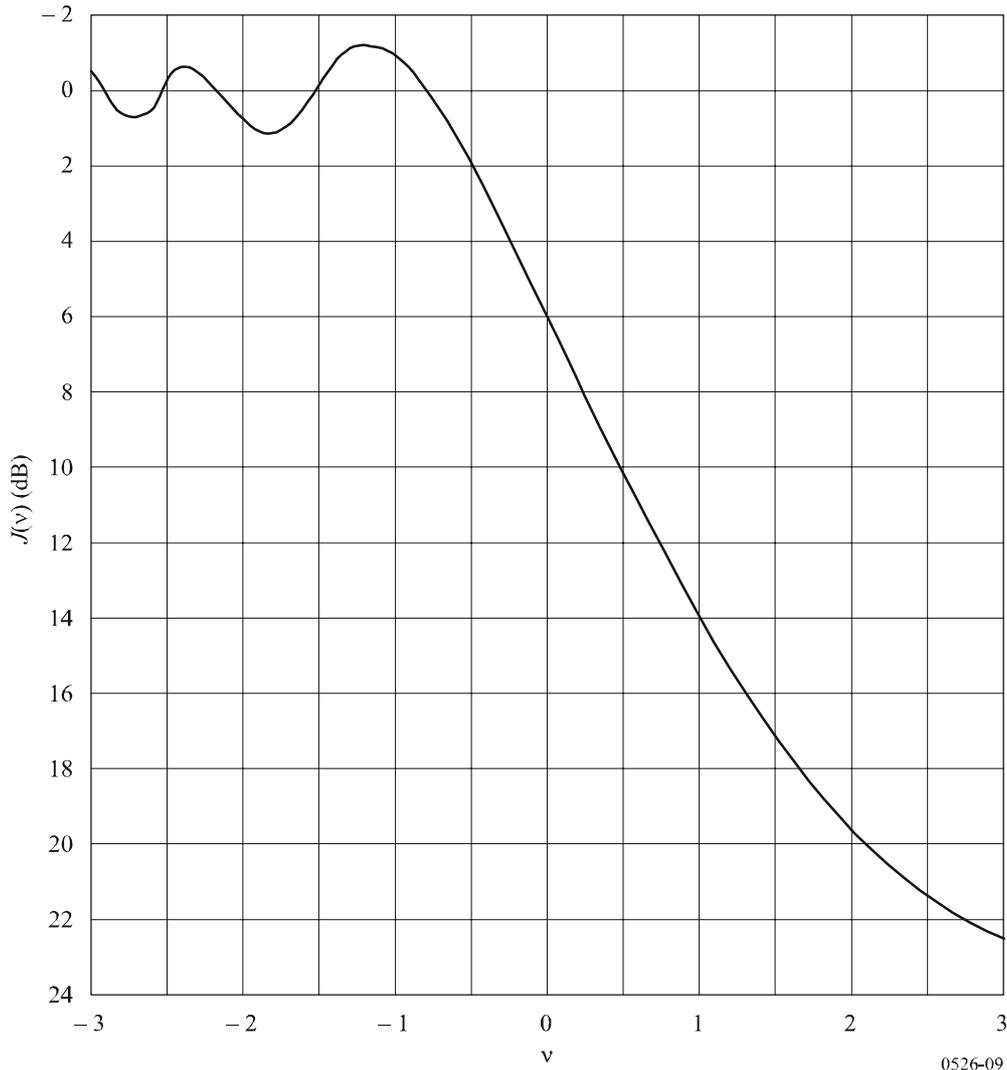
où $C(v)$ et $S(v)$ sont respectivement la partie réelle et la partie imaginaire de l'intégrale complexe de Fresnel $F(v)$ définie au § 2.7.

Pour une valeur de v supérieure à $-0,78$, on peut obtenir une valeur approximative à partir de l'expression:

$$J(v) = 6,9 + 20 \log \left(\sqrt{(v - 0,1)^2 + 1} + v - 0,1 \right) \quad \text{dB} \quad (27)$$

FIGURE 9

Affaiblissement de diffraction sur une arête en lame de couteau



4.2 Obstacle unique de sommet arrondi

La géométrie d'un obstacle de sommet arrondi de rayon R est illustrée dans la Fig. 8c). On notera que les distances d_1 et d_2 , et la hauteur h au-dessus de la ligne de base sont toutes mesurées par rapport au point d'intersection des rayons tangents à l'obstacle. L'affaiblissement de diffraction correspondant à cette géométrie peut être calculé sous la forme:

$$A = J(v) + T(m,n) \quad \text{dB} \quad (28)$$

où:

- a) $J(v)$ est l'affaiblissement de Fresnel-Kirchoff provoqué par une arête en lame de couteau équivalente placée de manière à ce que son point culminant se situe au point d'intersection des rayons tangents (sommet fictif). Le paramètre sans dimension v peut être évalué à partir de l'une quelconque des relations (22) à (25) incluses. A titre d'exemple, en unités pratiques, la relation (22) donne:

$$v = 0,0316 h \left[\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2} \right]^{1/2} \quad (29)$$

où h et λ sont en mètres, et d_1 et d_2 sont en kilomètres.

On peut obtenir $J(v)$ à partir de la Fig. 9 ou de la relation (27). On notera qu'au cas où un obstacle empêche la propagation en visibilité directe, v est positif et que la relation (27) reste valable.

- b) $T(m,n)$ est l'affaiblissement supplémentaire dû à la courbure de l'obstacle:

$$T(m,n) = 7,2m^{1/2} - (2 - 12,5n)m + 3,6m^{3/2} - 0,8m^2 \quad \text{dB} \quad \text{pour } mn \leq 4 \quad (30a)$$

$$T(m,n) = -6 - 20 \log(mn) + 7,2m^{1/2} - (2 - 17n)m + 3,6m^{3/2} - 0,8m^2 \quad \text{dB} \quad \text{pour } mn > 4 \quad (30b)$$

et

$$m = R \left[\frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2} \right] \left/ \left[\frac{\pi R}{\lambda} \right]^{1/3} \right. \quad (31)$$

$$n = h \left[\frac{\pi R}{\lambda} \right]^{2/3} \left/ R \right. \quad (32)$$

et R , d_1 , d_2 , h et λ sont en unités cohérentes.

On notera que lorsque R tend vers zéro, $T(m,n)$ tend aussi vers zéro. Par conséquent, pour un cylindre de rayon nul, l'équation (28) se réduit au cas de la diffraction par une arête en lame de couteau.

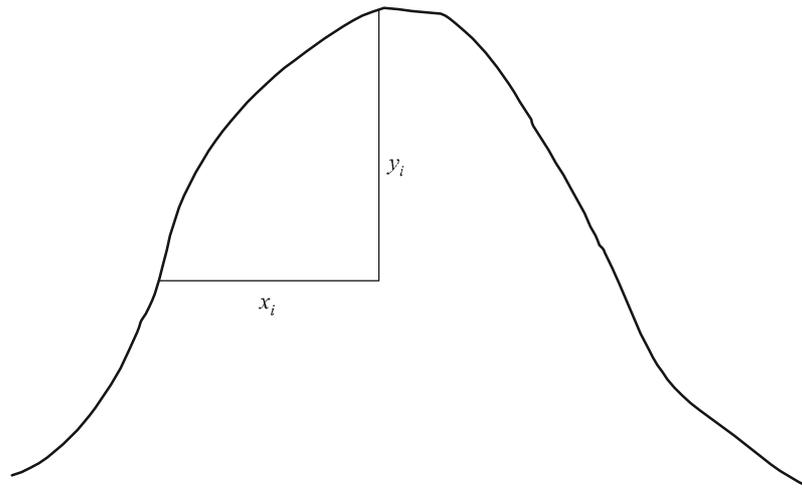
Le rayon de courbure de l'obstacle correspond au rayon de courbure du sommet d'une parabole ajustée au profil de l'obstacle, à proximité du sommet. Lorsqu'on ajuste la parabole, la distance verticale maximale depuis le sommet à utiliser dans cette méthode devrait être de l'ordre du rayon de la première zone de Fresnel où est situé l'obstacle. Un exemple de cette procédure est illustré à la Fig. 10 où:

$$y_i = \frac{x_i^2}{2r_i} \quad (33)$$

et r_i est le rayon de courbure correspondant à l'échantillon i du profil vertical de l'arête. Dans le cas de N échantillons, le rayon de courbure médian de l'obstacle est donné par:

$$r = \frac{1}{N} \sum_1^N \frac{x_i^2}{2y_i} \quad (34)$$

FIGURE 10
Profil vertical de l'obstacle



0526-10

4.3 Deux arêtes isolées

Cette méthode consiste à appliquer successivement aux deux obstacles la théorie de la diffraction par une arête unique en lame de couteau, le sommet du premier obstacle servant de source à la diffraction sur le second (voir la Fig. 11). Le premier trajet de diffraction défini par les distances a et b et la hauteur h'_1 donne un affaiblissement L_1 (dB). Le deuxième trajet de diffraction défini par les distances b et c et la hauteur h'_2 donne un affaiblissement L_2 (dB). L_1 et L_2 sont calculés en appliquant les formules du § 4.1. Il faut ajouter un terme de correction L_c (dB) pour tenir compte de l'écart b entre les arêtes. L_c peut être évalué à l'aide de la formule suivante:

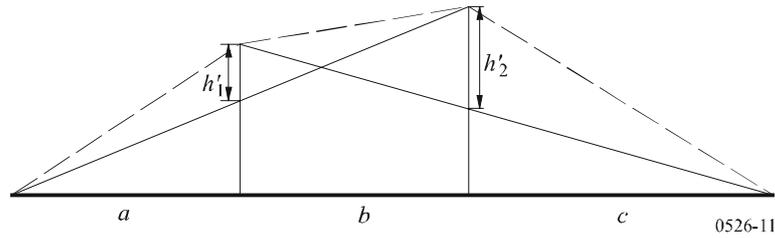
$$L_c = 10 \log \left[\frac{(a + b)(b + c)}{b(a + b + c)} \right] \quad (35)$$

qui est valable lorsque chacune des valeurs L_1 et L_2 dépasse 15 dB environ. L'affaiblissement de diffraction total est alors donné par:

$$L = L_1 + L_2 + L_c \quad (36)$$

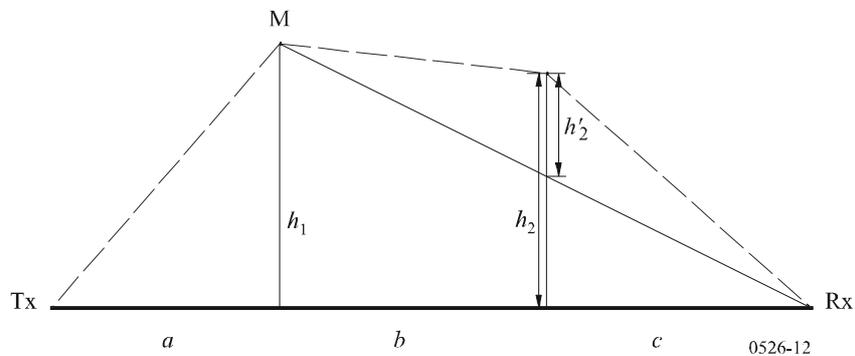
La méthode ci-dessus s'avère particulièrement appropriée lorsque les deux arêtes conduisent à des affaiblissements similaires.

FIGURE 11
Méthode applicable avec deux arêtes isolées



Si une arête est prédominante (voir la Fig. 12), le premier trajet de diffraction est défini par les distances a et $b + c$ et par la hauteur h_1 . Le second trajet de diffraction est défini par les distances b et c et par la hauteur h'_2 .

FIGURE 12
Obstacles principal et secondaire



La méthode consiste à appliquer successivement aux deux obstacles la théorie de la diffraction par une arête unique en lame de couteau. On détermine d'abord l'obstacle principal M, qui correspond au rapport h/r le plus élevé (où h est la hauteur de l'arête par rapport au trajet direct TxRx indiqué sur la Fig. 12, et r est le rayon du premier ellipsoïde de Fresnel donné par l'équation (2)). On utilise ensuite h'_2 (hauteur de l'obstacle secondaire par rapport au sous-trajet MR pour calculer l'affaiblissement induit par cette seconde arête). Un terme correctif T_c (dB) doit être soustrait, afin de prendre en compte la distance entre les deux arêtes ainsi que leur hauteur respective. On peut évaluer ce terme comme suit:

$$T_c = \left[12 - 20 \log_{10} \left(\frac{2}{1 - \frac{\alpha}{\pi}} \right) \right] \left(\frac{q}{p} \right)^{2p} \quad (37)$$

où:

$$p = \left[\frac{2}{\lambda} \frac{(a+b+c)}{(b+c)a} \right]^{1/2} h_1 \quad (38a)$$

$$q = \left[\frac{2}{\lambda} \frac{(a+b+c)}{(a+b)c} \right]^{1/2} h_2 \quad (38b)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \left[\frac{b(a+b+c)}{ac} \right]^{1/2} \quad (38c)$$

h_1 et h_2 étant les hauteurs des arêtes par rapport au trajet direct émetteur-récepteur.

L'affaiblissement de diffraction total est donné par:

$$L = L_1 + L_2 - T_c \quad (39)$$

La même méthode peut s'appliquer aussi aux cas des obstacles arrondis en utilisant le § 4.3.

Dans les cas où l'on peut identifier sans ambiguïté que l'obstacle à l'origine de la diffraction est un bâtiment à toit plat, une approximation par arête unique en lame de couteau n'est pas suffisante. Il faut calculer la somme vectorielle de deux composantes: l'une qui subit une double diffraction par deux arêtes en lame de couteau et l'autre qui est soumise à une réflexion supplémentaire sur la surface du toit. Il a été montré que, lorsque la réflectivité de la surface du toit et la différence de hauteur entre la surface du toit et les parois latérales n'étaient pas connues avec précision, un modèle à arête double en lame de couteau donnait une bonne estimation de l'intensité du champ diffracté, en négligeant la composante réfléchie.

4.4 Plusieurs obstacles isolés

Deux méthodes sont recommandées pour l'estimation de l'affaiblissement de diffraction sur un terrain irrégulier qui présente un ou plusieurs obstacles à la propagation en visibilité directe. Dans la première, on suppose que chaque obstacle peut être représenté par un cylindre de rayon égal au rayon de courbure au sommet de l'obstacle. Cette méthode est recommandée lorsqu'on dispose d'un profil vertical détaillé de la liaison émetteur/récepteur.

La seconde correspond à une solution empirique basée sur l'hypothèse d'obstacles en arêtes en lame de couteau auxquels s'ajoute une correction pour compenser l'affaiblissement plus important dû à un rayon de courbure différent de zéro. Le calcul tient compte de la courbure de la Terre en utilisant le concept de rayon terrestre équivalent (voir le § 4.3 de la Recommandation UIT-R P.452). Cette méthode est applicable au cas où une seule procédure générale est nécessaire pour les trajets terrestres au-dessus du sol ou de la mer, en visibilité directe et transhorizon.

On doit disposer d'un profil du trajet radioélectrique sous la forme d'un ensemble d'échantillons donnant les hauteurs du sol au-dessus du niveau de la mer en différents points ordonnés le long du trajet, la première et la dernière étant les hauteurs de l'émetteur et du récepteur au-dessus du niveau de la mer, et d'un ensemble correspondant de distances horizontales depuis l'émetteur. Chaque couple de hauteur et de distance constitue un point du profil auquel on attribue un indice, les indices étant incrémentés d'une extrémité à l'autre du trajet. Bien que ce ne soit pas essentiel pour la méthode, on suppose, dans la description ci-après, que les indices sont incrémentés de l'émetteur vers le récepteur. Il est préférable mais non essentiel que l'espacement horizontal des échantillons du profil soit constant.

4.4.1 Méthode des cylindres en cascade

Le profil de hauteur du terrain devrait être disponible sous forme d'un ensemble d'échantillons donnant les hauteurs du sol au-dessus du niveau de la mer, la première et la dernière étant les hauteurs de l'émetteur et du récepteur au-dessus du niveau de la mer. Les valeurs de distance et de hauteur devraient être stockées en ensembles auxquels on attribue des indices de 1 à N , où N est égal au nombre d'échantillons du profil.

Par la suite, on utilise systématiquement les suffixes:

h_i : hauteur au-dessus du niveau de la mer du $i^{\text{ième}}$ point

d_i : distance entre l'émetteur et le $i^{\text{ième}}$ point

d_{ij} : distance entre le $i^{\text{ième}}$ et le $j^{\text{ième}}$ point.

La première étape consiste à effectuer une analyse du profil à l'aide de la méthode de la «corde tendue». On détermine ainsi les points échantillons que toucherait une corde tendue au-dessus du profil entre l'émetteur et le récepteur.

Pour ce faire, on peut utiliser la procédure suivante dans laquelle toutes les valeurs de hauteur et de distance sont exprimées en unités cohérentes et tous les angles sont exprimés en radians. La méthode est faite d'approximations qui sont valables pour des trajets radioélectriques formant de petits angles par rapport à l'horizontale. Si, sur un trajet, certains rayons ont une pente de plus 5° environ, l'utilisation d'une géométrie exacte peut se justifier.

Chaque point sur la corde correspond au point du profil présentant l'angle d'élévation le plus élevé au-dessus de l'horizontale locale, vu depuis le point précédent sur la corde, en commençant à une extrémité du profil et en terminant à l'autre. Vu depuis le point s , l'angle d'élévation du $i^{\text{ième}}$ échantillon du profil ($i > s$) est donné par:

$$e = [(h_i - h_s) / d_{si}] - [d_{si} / 2a_e] \quad (40)$$

où:

a_e : rayon équivalent de la Terre donné par:

$$= k \times 6371 \text{ (km)}$$

et:

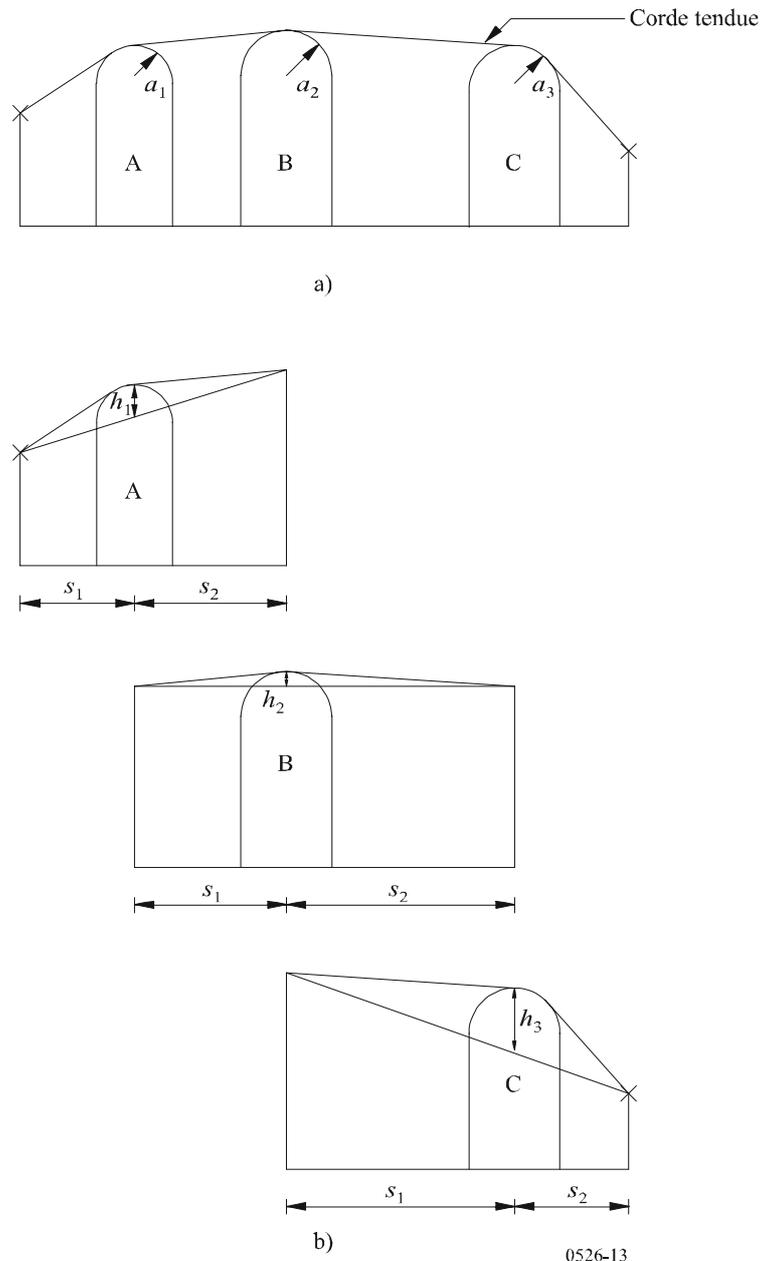
k : coefficient du rayon équivalent de la Terre.

Un essai est réalisé pour déterminer si un groupe de deux ou plus de deux points sur la corde devrait représenter le même obstacle sur le terrain. Pour des échantillons espacés d'au plus 250 m, tout groupe de points sur la corde qui sont des échantillons de profil consécutifs autres que l'émetteur et le récepteur, devrait être traité comme un seul et même obstacle.

Chaque obstacle est alors modélisé comme un cylindre (voir la Fig. 13). La géométrie de chaque cylindre correspond à celle de la Fig. 8 c). On notera que dans la Fig. 13 les distances s_1 , s_2 pour chaque cylindre sont illustrées comme étant mesurées horizontalement entre les points des sommets; pour des rayons quasi horizontaux, ces distances se rapprochent des distances le long de la pente d_1 et d_2 de la Fig. 8 c). Dans le cas de rayons dont les angles par rapport à l'horizontale sont supérieurs à 5° environ, il faudra peut-être que les distances s_1 et s_2 soient égales aux distances d_1 et d_2 le long de la pente entre les sommets.

FIGURE 13

Modèle des cylindres en cascade a) problème général, b) détails



De même dans la Fig. 13, la hauteur h de chaque cylindre est mesurée verticalement depuis son sommet jusqu'à la droite joignant les points du sommet ou du terminal adjacents. La valeur de h pour chaque cylindre correspond à h dans la Fig. 8 c). Là aussi, pour des rayons quasi horizontaux, les hauteurs des cylindres peuvent être calculées comme étant verticales mais pour des rayons qui ont des angles plus importants, il faudra peut-être calculer h à angles droits par rapport à la base du cylindre pour le rayon considéré.

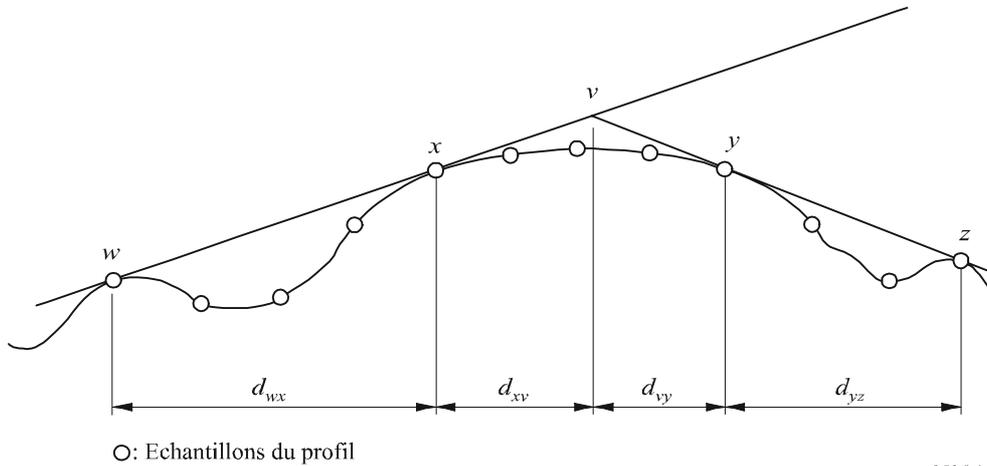
La Fig. 14 illustre la géométrie dans le cas d'un obstacle composé de plus d'un point sur la corde. Les points suivants sont indiqués comme suit:

- w: point sur la corde le plus proche ou terminal côté émetteur de l'obstacle qui ne fait pas partie de l'obstacle
- x: point sur la corde faisant partie de l'obstacle qui est le plus proche de l'émetteur
- y: point sur la corde faisant partie de l'obstacle qui est le plus proche du récepteur

- z: point sur la corde le plus proche ou terminal côté récepteur de l'obstacle qui ne fait pas partie de l'obstacle
- v: point du sommet correspondant à l'intersection des rayons incidents au-dessus de l'obstacle.

FIGURE 14

Géométrie d'un obstacle composé de plusieurs points



0526-14

Les lettres w , x , y et z seront aussi les indices attribués aux ensembles d'échantillons de hauteur et de distance du profil. Pour un obstacle ayant un point isolé sur la corde, x et y auront la même valeur et renverront à un point du profil qui coïncide avec le sommet. On notera que pour des cylindres en cascade, les points y et z pour un cylindre sont les points w et x pour le cylindre suivant, etc.

Une méthode progressive permettant d'ajuster les cylindres au profil général du terrain est décrite dans l'Appendice 1 à l'Annexe 1. Chaque obstacle est caractérisé par w , x , y et z . La méthode de l'Appendice 1 à l'Annexe 1 est ensuite utilisée pour obtenir les paramètres du cylindre s_1 , s_2 , h et R . Après avoir modélisé ainsi le profil, on calcule l'affaiblissement de diffraction pour le trajet comme étant égal à la somme de trois termes:

- la somme des affaiblissements de diffraction sur les cylindres;
- la somme de la diffraction sur les sous-trajets entre les cylindres (ainsi qu'entre les cylindres et les terminaux adjacents);
- un facteur de correction.

L'affaiblissement de diffraction total (dB) par rapport à l'affaiblissement en espace libre peut s'écrire comme suit:

$$L_d = \sum_{i=1}^N L'_i + L''(w x)_1 + \sum_{i=1}^N L''(y z)_i - 20 \log C_N \quad \text{dB} \quad (41)$$

où:

- L'_i : affaiblissement de diffraction sur le $i^{\text{ème}}$ cylindre, calculé selon la méthode du § 4.2
- $L''(w x)_1$: affaiblissement de diffraction sur le sous-trajet pour le tronçon du trajet compris entre les points w et x , pour le premier cylindre
- $L''(y z)_i$: affaiblissement de diffraction sur le sous-trajet pour le tronçon du trajet compris entre les points y et z , pour tous les cylindres

C_N : facteur de correction pour tenir compte de l'affaiblissement d'étalement dû à la diffraction sur les cylindres successifs.

L'Appendice 2 à l'Annexe 1 donne une méthode de calcul de L'' pour chaque tronçon en LoS du trajet entre les obstacles.

Le facteur de correction, C_N , est calculé à l'aide de:

$$C_N = (P_a / P_b)^{0,5} \quad (42)$$

où:

$$P_a = s_1 \prod_{i=1}^N [(s_2)_i] \left(s_1 + \sum_{j=1}^N [(s_2)_j] \right) \quad (43)$$

$$P_b = (s_1)_1 (s_2)_N \prod_{i=1}^N [(s_1)_i + (s_2)_i] \quad (44)$$

et les suffixes dans les crochets renvoient aux différents cylindres.

4.4.2 Méthode des arêtes en lame de couteau en cascade

La méthode est fondée sur une procédure qui est utilisée de 1 à 3 fois selon le profil du trajet. Cette procédure consiste à déterminer le point d'une section donnée du profil où la caractéristique géométrique v , telle qu'elle est décrite au § 4.1, a la valeur la plus élevée. La section du profil à examiner est définie depuis le point d'indice a jusqu'au point d'indice b ($a < b$). Si $a + 1 = b$, il n'existe pas de point intermédiaire et l'affaiblissement dû à la diffraction pour la section du trajet considérée est nul. Dans les autres cas, on applique la construction en évaluant v_n ($a < n < b$) et en sélectionnant le point ayant la plus grande valeur de v . La valeur de v associée au n^e point du profil est donnée par:

$$v_n = h \sqrt{2d_{ab} / \lambda d_{an} d_{nb}} \quad (45)$$

où:

$$h = h_n + [d_{an} d_{nb} / 2 r_e] - [(h_a d_{nb} + h_b d_{an}) / d_{ab}] \quad (45a)$$

h_a, h_b, h_n : hauteurs (représentées sur la Fig. 15)

d_{an}, d_{nb}, d_{ab} : distances horizontales (représentées sur la Fig. 15)

r_e : rayon terrestre équivalent

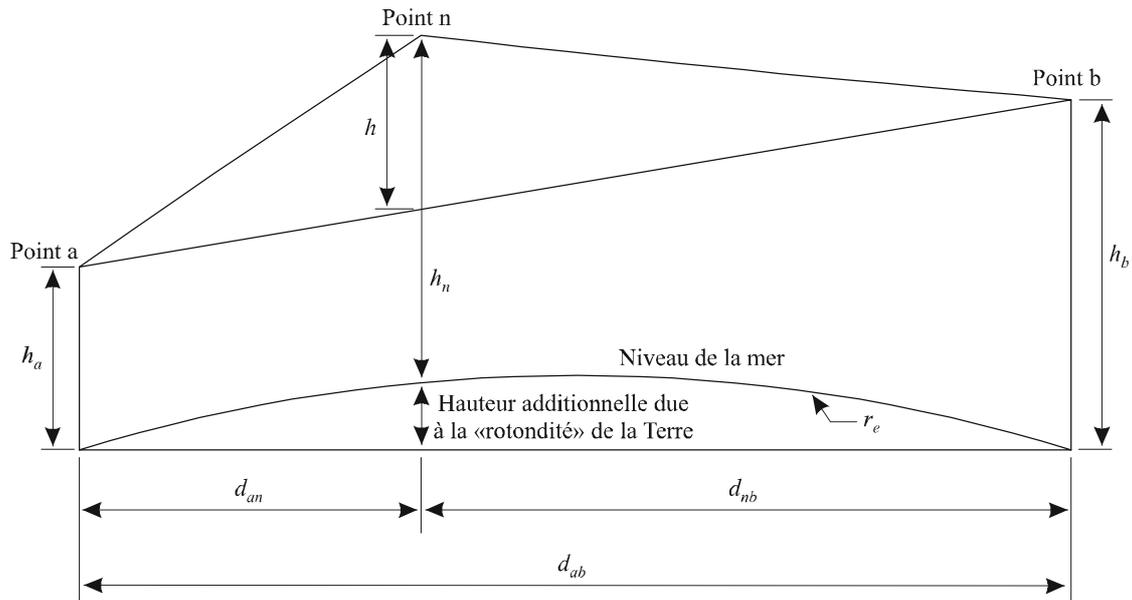
λ : longueur d'onde

et toutes les valeurs de h, d, r_e et λ sont dans des unités cohérentes.

L'affaiblissement dû à la diffraction est alors calculé au moyen de la formule (27), qui donne l'affaiblissement $J(v)$ pour une arête en lame de couteau, pour $v > -0,78$ et il est nul dans les autres cas.

Il convient de noter que la formule (45) découle directement de la formule (22). Les éléments géométriques intervenant dans la formule (45a) sont illustrés sur la Fig. 15. Le second terme de la formule (45a) est une bonne approximation de la différence de hauteur au point n due à la courbure de la Terre.

FIGURE 15
Géométrie dans le cas d'une seule arête



0526-15

On applique d'abord la procédure indiquée ci-dessous à l'ensemble du profil, de l'émetteur au récepteur. On appelle arête principale, p , le point ayant la plus grande valeur de v et on désigne par $J(v_p)$ l'affaiblissement correspondant.

Si $v_p > -0,78$, on applique la procédure encore deux fois:

- entre l'émetteur et le point p pour obtenir v_t et donc $J(v_t)$;
- entre le point p et le récepteur pour obtenir v_r et donc $J(v_r)$.

L'affaiblissement supplémentaire dû à la diffraction pour le trajet est alors donné par:

$$L = J(v_p) + T [J(v_t) + J(v_r) + C] \quad \text{pour} \quad v_p > -0,78 \quad (46a)$$

$$L = 0 \quad \text{pour} \quad v_p \leq -0,78 \quad (46b)$$

où:

C : correction empirique

$$C = 10,0 + 0,04D \quad (47)$$

D : longueur totale du trajet (km)

et

$$T = 1,0 - \exp [-J(v_p) / 6,0] \quad (48)$$

Il convient de noter que la procédure décrite ci-dessus, pour les trajets transhorizon, est fondée sur la méthode de Deygout limitée au maximum à 3 arêtes. Pour les trajets en visibilité directe, elle diffère de la construction de Deygout car deux arêtes secondaires sont encore utilisées lorsque l'arête principale entraîne un affaiblissement dû à une diffraction non nulle.

Cette méthode peut entraîner des discontinuités de la variation de l'affaiblissement de diffraction prévu en fonction du rayon terrestre équivalent, par suite de la sélection de différents points du profil pour l'arête principale ou les arêtes secondaires. Pour obtenir une prévision monotone et sans discontinuités de l'affaiblissement de diffraction en fonction du rayon terrestre équivalent, l'arête principale et, si elles existent, les arêtes secondaires de chaque côté, peuvent d'abord être

déterminées pour le rayon terrestre équivalent médian. On peut ensuite utiliser ces arêtes pour calculer les affaiblissements de diffraction pour d'autres valeurs du rayon terrestre équivalent, sans répéter la procédure de localisation de ces points. Toutefois, cette méthode peut être moins précise pour des valeurs du rayon terrestre équivalent supérieures ou inférieures à la valeur médiane.

La méthode des arêtes en lame de couteau en cascade est utilisée pour le modèle de diffraction décrit dans la Recommandation UIT-R P.452. Les affaiblissements de diffraction sont calculés pour deux valeurs du rayon terrestre équivalent: la valeur médiane, et la valeur dépassée pendant $\beta_0\%$ d'une année moyenne, pour laquelle on utilise un facteur de courbure de la Terre égal à 3. Le paramètre β_0 représente le pourcentage de temps pendant lequel des conditions anormales de propagation auront une influence prépondérante sur le résultat général. On utilise ensuite une procédure d'interpolation, fondée sur la distribution normale cumulative complémentaire inverse, pour calculer l'affaiblissement de diffraction qui n'est pas dépassé pour un pourcentage de temps compris entre β_0 et 50%. Toutefois, pour le calcul de l'affaiblissement de diffraction pendant $\beta_0\%$ du temps, la méthode décrite dans la Recommandation UIT-R P.452 utilise l'arête principale et, si elles existent, les arêtes secondaires, identifiées pour le cas médian. On évite ainsi le risque qu'une petite modification des détails du profil entraîne une modification importante de l'affaiblissement de diffraction pendant β_0 de temps, à la suite d'une modification de ces arêtes.

5 Diffraction par écrans minces

Dans les méthodes qui suivent, on suppose que l'obstacle a la forme d'un écran mince. Ces méthodes peuvent s'appliquer à la propagation autour d'un obstacle ou à travers une ouverture.

5.1 Ecran de largeur finie

On peut supprimer les brouillages affectant un site de réception (par exemple, une petite station terrienne) en plaçant un écran artificiel de largeur finie transversalement à la direction de propagation. Dans ce cas, on peut calculer le champ dans l'ombre de l'écran en considérant trois arêtes en lame de couteau, à savoir le sommet et les deux côtés de l'écran. Les brouillages constructifs et destructifs des trois contributions indépendantes conduisent à des fluctuations rapides du champ sur des distances de l'ordre d'une longueur d'onde. Le modèle simplifié ci-après permet d'avoir une estimation de l'affaiblissement de diffraction moyen et de l'affaiblissement de diffraction minimal en fonction de la position. Ce modèle consiste à additionner les amplitudes des différentes contributions pour obtenir une estimation de l'affaiblissement de diffraction minimal ainsi que les puissances pour obtenir une estimation de l'affaiblissement de diffraction moyen. Ce modèle a été validé à l'aide de calculs précis utilisant la théorie uniforme de la diffraction et des mesures (TUD) de grande précision.

Etape 1: Calculer le paramètre géométrique v pour chacune des trois arêtes en lame de couteau (sommet, côté gauche et côté droit) en utilisant l'une des équations (22) à (25).

Etape 2: Calculer le facteur d'affaiblissement $j(v) = 10^{J(v)/20}$ associé à chaque arête, à partir de l'équation (27).

Etape 3: Calculer l'affaiblissement de diffraction minimal J_{min} comme suit:

$$J_{min}(v) = -20 \log \left[\frac{1}{j_1(v)} + \frac{1}{j_2(v)} + \frac{1}{j_3(v)} \right] \quad \text{dB} \quad (49)$$

ou, autre façon,

Etape 4: Calculer l'affaiblissement de diffraction moyen J_{av} à partir de:

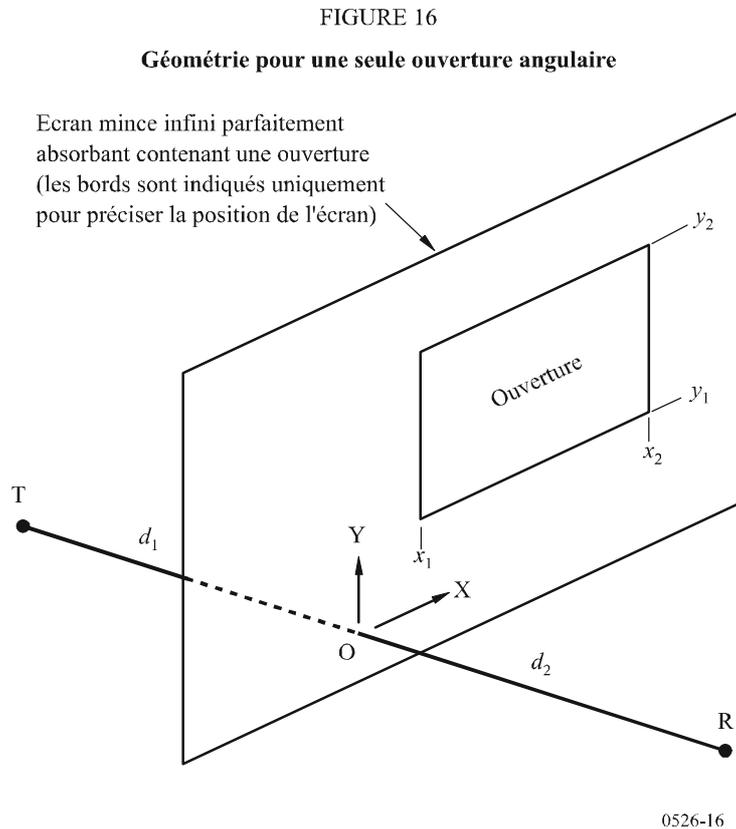
$$J_{av}(v) = -10 \log \left[\frac{1}{j_1^2(v)} + \frac{1}{j_2^2(v)} + \frac{1}{j_3^2(v)} \right] \quad \text{dB} \quad (50)$$

5.2 Diffraction par des ouvertures rectangulaires ou par des ouvertures ou des écrans composites

La méthode décrite ci-après peut être utilisée pour prévoir l'affaiblissement de diffraction dû à une ouverture rectangulaire dans un écran mince, par ailleurs parfaitement absorbant. La méthode peut être élargie à plusieurs ouvertures rectangulaires ou écrans finis; elle constitue donc une autre méthode dans le cas d'un écran à largeur finie (voir le § 5.1).

5.2.1 Diffraction par une seule ouverture rectangulaire

La Fig. 16 illustre la géométrie utilisée pour représenter une ouverture rectangulaire dans un écran mince infini parfaitement absorbant.



Les positions des bords de l'ouverture, x_1 , x_2 , y_1 et y_2 , sont exprimées dans un système de coordonnées cartésiennes, l'origine étant située au point où la droite entre l'émetteur T et le récepteur R coupe l'écran, la propagation étant parallèle à l'axe des Z. T et R sont à des distances d_1 et d_2 respectivement derrière et devant l'écran.

Le champ, e_a , au niveau du récepteur, en unités linéaires normalisées pour l'espace libre, est donné sous une forme complexe par:

$$e_a(x_1, x_2, y_1, y_2) = 0,5(C_x C_y - S_x S_y) + j 0,5 (C_x S_y + S_x C_y) \quad (51)$$

où:

$$C_x = C(v_{x2}) - C(v_{x1}) \quad (52a)$$

$$C_y = C(v_{y2}) - C(v_{y1}) \quad (52b)$$

$$S_x = S(v_{x2}) - S(v_{x1}) \quad (52c)$$

$$S_y = S(v_{y2}) - S(v_{y1}) \quad (52d)$$

Les quatre valeurs de v sont celles données par l'équation (22) en remplaçant h successivement par x_1 , x_2 , y_1 et y_2 , et $C(v)$ et $S(v)$ sont donnés dans les équations (7a) et (7b) et peuvent être évaluées à partir du coefficient de Fresnel complexe en utilisant les équations (8a) et (8b).

L'affaiblissement de diffraction correspondant, L_a , est donné par:

$$L_a = -20 \log(e_a) \quad \text{dB} \quad (53)$$

5.2.2 Diffraction par une combinaison d'ouvertures ou d'écrans

La méthode pour une seule ouverture rectangulaire peut être élargie comme suit:

Etant donné qu'en unités linéaires normalisées pour l'espace libre (équation (51)), le champ en espace libre est donné par $1,0 + j,0,0$, le champ complexe normalisé, e_s , dû à un seul écran rectangulaire (isolé du sol) est donné par:

$$e_s = 1,0 - e_a \quad (54)$$

où e_a est calculé en utilisant l'équation (51) pour une ouverture de même taille et de même position que l'écran.

- Le champ normalisé dû à des combinaisons de plusieurs ouvertures rectangulaires ou écrans isolés peut être calculé en additionnant les résultats de l'équation (51) ou (54).
- On peut obtenir une approximation d'ouvertures ou d'écrans de forme arbitraire en utilisant des combinaisons adéquates d'écrans ou d'ouvertures rectangulaires.
- Etant donné que les intégrales $C(v)$ et $S(v)$ convergent vers $0,5 + j 0,5$ lorsque v tend vers l'infini, l'équation (50) peut être appliquée à des rectangles d'étendue illimitée dans une ou plusieurs directions.

6 Diffraction sur un dièdre de conductivité finie

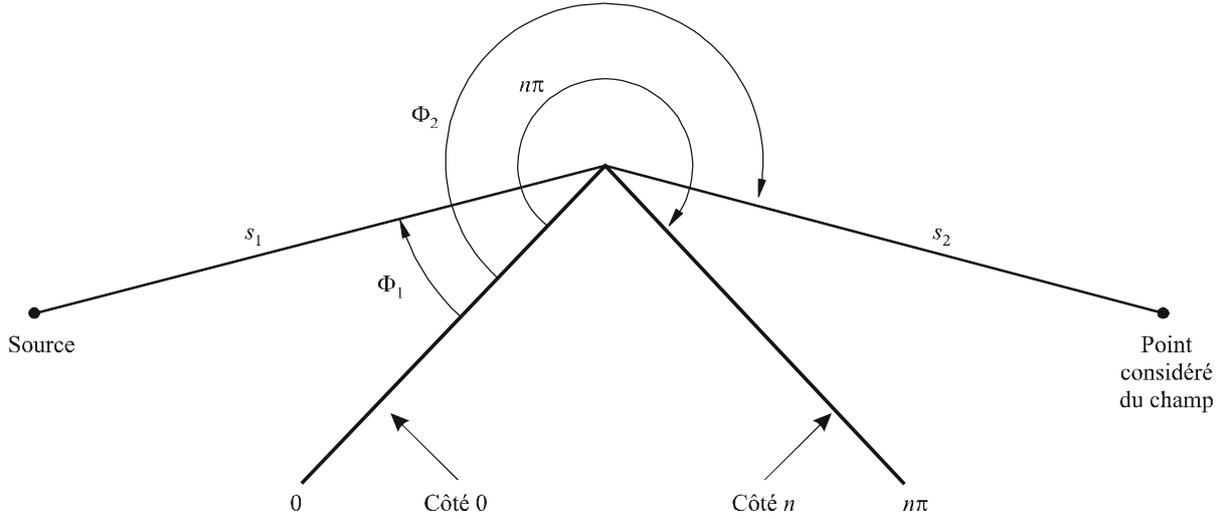
La méthode décrite ci-après peut être utilisée pour prévoir l'affaiblissement de diffraction dû à un dièdre de conductivité finie. Elle peut s'appliquer de manière appropriée pour l'étude de la diffraction par l'angle d'un bâtiment, l'arête d'un toit ou lorsque le terrain peut se caractériser par une colline présentant un profil en coin. Cette méthode nécessite de connaître la conductivité et la constante diélectrique relative du dièdre, et fait l'hypothèse qu'aucune émission ne traverse cet obstacle.

La méthode est fondée sur la TUD. Elle tient compte de la diffraction tant dans la zone d'ombre que dans la zone en visibilité directe, et une méthode est fournie pour une transition progressive entre ces zones.

La Fig. 17 illustre la géométrie d'un dièdre de conductivité finie.

FIGURE 17

Géométrie pour l'application de la diffraction par un dièdre suivant la TUD



0526-17

La formule donnée par la TUD pour le champ électrique au point considéré du champ, en se restreignant à un espace à deux dimensions, est la suivante:

$$e_{TUD} = e_0 \frac{\exp(-jks_1)}{s_1} D_{\parallel}^{\perp} \cdot \sqrt{\frac{s_1}{s_2(s_1 + s_2)}} \cdot \exp(-jks_2) \quad (55)$$

où:

e_{TUD} : champ électrique au point considéré du champ

e_0 : amplitude relative de la source

s_1 : distance entre le point source et l'arête de diffraction

s_2 : distance entre l'arête de diffraction et le point considéré du champ

k : nombre d'ondes $2\pi/\lambda$

D_{\parallel}^{\perp} : coefficient de diffraction dépendant de la polarisation (parallèle ou perpendiculaire au plan d'incidence) du champ incident sur l'arête

et s_1 , s_2 et λ sont exprimés dans des unités cohérentes.

Le coefficient de diffraction d'un dièdre de conductivité finie est donné par:

$$D_{\parallel}^{\perp} = \frac{-\exp(-j\pi/4)}{2n\sqrt{2\pi k}} \left\{ \begin{array}{l} \cot\left(\frac{\pi + (\Phi_2 - \Phi_1)}{2n}\right) \cdot F(kLa^+(\Phi_2 - \Phi_1)) \\ + \cot\left(\frac{\pi - (\Phi_2 - \Phi_1)}{2n}\right) \cdot F(kLa^-(\Phi_2 - \Phi_1)) \\ + R_0^{\perp} \cdot \cot\left(\frac{\pi - (\Phi_2 + \Phi_1)}{2n}\right) \cdot F(kLa^-(\Phi_2 + \Phi_1)) \\ + R_n^{\perp} \cdot \cot\left(\frac{\pi + (\Phi_2 + \Phi_1)}{2n}\right) \cdot F(kLa^+(\Phi_2 + \Phi_1)) \end{array} \right\} \quad (56)$$

où:

Φ_1 : angle d'incidence, mesuré à partir du côté incident (côté 0)

Φ_2 : angle de diffraction, mesuré à partir du côté incident (côté 0)

n : nombre qui, multiplié par π radians, donne l'angle saillant du dièdre (angle réel = $n\pi$ (rad))

$$j = \sqrt{-1}$$

et où $F(x)$ est une intégrale de Fresnel:

$$F(x) = 2j\sqrt{x} \cdot \exp(jx) \cdot \int_{\sqrt{x}}^{\infty} \exp(-jt^2) dt \quad (57)$$

$$\int_{\sqrt{x}}^{\infty} \exp(-jt^2) dt = \sqrt{\frac{\pi}{8}}(1 - j) - \int_0^{\sqrt{x}} \exp(-jt^2) dt \quad (58)$$

Cette intégrale peut se calculer par intégration numérique.

On peut aussi avoir recours à l'approximation utile suivante:

$$\int_{\sqrt{x}}^{\infty} \exp(-jt^2) dt = \sqrt{\frac{\pi}{2}} A(x) \quad (59)$$

où:

$$A(x) = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{1-j}{2} - \exp(-jx) \sqrt{\frac{x}{4}} \sum_{n=0}^{11} \left[(a_n + jb_n) \left(\frac{x}{4}\right)^n \right] & \text{si } x < 4 \\ -\exp(-jx) \sqrt{\frac{4}{x}} \sum_{n=0}^{11} \left[(c_n + jd_n) \left(\frac{4}{x}\right)^n \right] & \text{dans les autres cas} \end{array} \right\} \quad (60)$$

et les coefficients a, b, c, d sont donnés au § 2.7:

$$L = \frac{s_2 \cdot s_1}{s_2 + s_1} \quad (61)$$

$$a^{\pm}(\beta) = 2 \cos^2 \left(\frac{2n\pi N^{\pm} - \beta}{2} \right) \quad (62)$$

où:

$$\beta = \Phi_2 \pm \Phi_1 \quad (63)$$

Dans l'équation (41), N^{\pm} sont les entiers qui satisfont le mieux à l'équation suivante:

$$N^{\pm} = \frac{\beta \pm \pi}{2n\pi} \quad (64)$$

R_0^\perp, R_n^\perp sont les coefficients de réflexion pour la polarisation perpendiculaire et la polarisation parallèle. Ils sont donnés par:

$$R^\perp = \frac{\sin(\Phi) - \sqrt{\eta - \cos(\Phi)^2}}{\sin(\Phi) + \sqrt{\eta - \cos(\Phi)^2}} \quad (65)$$

$$R^\parallel = \frac{\eta \cdot \sin(\Phi) - \sqrt{\eta - \cos(\Phi)^2}}{\eta \cdot \sin(\Phi) + \sqrt{\eta - \cos(\Phi)^2}} \quad (66)$$

où:

$$\Phi = \Phi_1 \text{ pour } R_0 \text{ et } \Phi = (n\pi - \Phi_2) \text{ pour } R_n$$

$$\eta = \varepsilon_r - j \times 18 \times 10^9 \sigma / f$$

ε_r : constante diélectrique relative du dièdre

σ : conductivité du dièdre (S/m)

f : fréquence (Hz).

Il convient de noter qu'au besoin, les deux côtés du dièdre peuvent présenter des propriétés électriques différentes.

Aux limites entre les zones d'ombre et de réflexion, une des fonctions cotangentes de l'équation (56) présente une singularité.

D^\perp reste cependant fini et peut être évalué facilement. Pour ε petit, le terme contenant la fonction cotangente singulière peut s'exprimer de la façon suivante:

$$\cot\left(\frac{\pi \pm \beta}{2n}\right) \cdot F(kLa^\pm(\beta)) \cong n \cdot \left[\sqrt{2\pi kL} \cdot \text{sign}(\varepsilon) - 2kL\varepsilon \cdot \exp(j\pi/4) \right] \cdot \exp(j\pi/4) \quad (67)$$

où ε est défini par:

$$\varepsilon = \pi + \beta - 2\pi nN^+ \quad \text{pour } \beta = \Phi_2 + \Phi_1 \quad (68)$$

$$\varepsilon = \pi - \beta + 2\pi nN^- \quad \text{pour } \beta = \Phi_2 - \Phi_1 \quad (69)$$

La valeur du coefficient de diffraction résultant sera continue aux limites entre les zones d'ombre et de réflexion, à condition que le même coefficient de réflexion soit utilisé pour le calcul des rayons réfléchis.

Le champ e_{LD} dû au rayon diffracté, auquel s'ajoute le rayon en visibilité directe pour $(\Phi_2 - \Phi_1) < \pi$, est donné par:

$$e_{LD} = \begin{cases} e_{TUD} + \frac{\exp(-jks)}{s} & \text{pour } \Phi_2 < \Phi_1 + \pi \\ e_{TUD} & \text{pour } \Phi_2 \geq \Phi_1 + \pi \end{cases} \quad (70)$$

où:

s : distance en ligne droite entre la source et les points considérés du champ.

Il convient de noter que lorsque $(\Phi_2 - \Phi_1) = \pi$, le second terme en cotangente de l'équation (56) présentera une singularité et qu'il faudra utiliser l'approximation donnée par l'équation (67).

L'intensité du champ (dB) au point considéré par rapport au champ qui existerait en ce point en l'absence du dièdre (c'est-à-dire, en dB par rapport à l'espace libre) est obtenue en fixant e_0 à l'unité dans l'équation (55) et en calculant:

$$E_{TUD} = 20 \log \left(\left| \frac{s \cdot e_{TUD}}{\exp(-jks)} \right| \right) \quad (71)$$

où:

s : distance en ligne droite entre la source et les points considérés du champ.

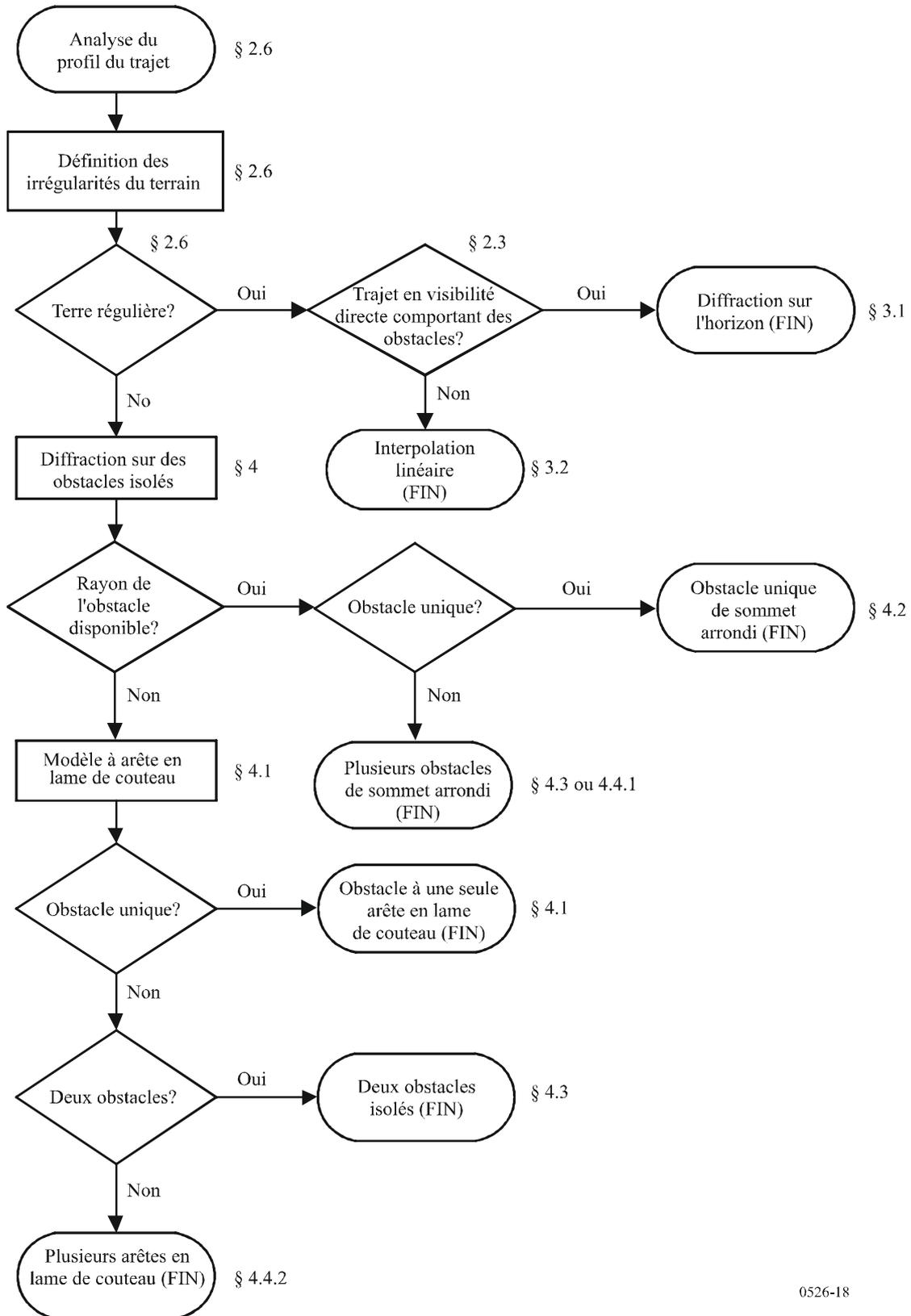
Il convient de noter que pour $n = 2$ et des coefficients de réflexion nuls, cette expression devrait donner les mêmes résultats que la courbe d'affaiblissement de diffraction sur une arête en lame de couteau représentée sur la Fig. 9.

Une version MathCAD de la formule de la TUD est disponible auprès du Bureau des radiocommunications.

7 Guide pour la propagation par diffraction

Un guide général pour évaluer l'affaiblissement par diffraction correspondant aux § 3 et 4 est indiqué à la Fig. 18. Ce diagramme résume la procédure à suivre dans chaque cas.

FIGURE 18
Guide pour la propagation par diffraction



Appendice 1 à l'Annexe 1

Calcul des paramètres des cylindres

La procédure ci-après peut être utilisée pour calculer les paramètres des cylindres (voir les Fig. 8 c) et 14) pour chacun des obstacles sur le terrain. On utilise des unités cohérentes et tous les angles sont exprimés en radians. Les approximations utilisées sont valables pour des trajets radioélectriques formant un angle d'environ 5° par rapport à l'horizontal.

1 Angles de diffraction et position du sommet

Bien qu'ils ne soient pas utilisés directement comme paramètres du cylindre, on a besoin de l'angle de diffraction sur le cylindre et de la position du sommet.

L'angle de diffraction sur l'obstacle est donné par la formule:

$$\theta = \alpha_w + \alpha_z + \alpha_e \quad (72)$$

où α_w et α_z sont les angles d'élévation des points x et y au-dessus de l'horizontale locale tels qu'ils sont vus respectivement depuis les points w et z , donnés par la formule:

$$\alpha_w = (h_x - h_w) / d_{wx} - d_{wx} / 2a_e \quad (73)$$

$$\alpha_z = (h_y - h_z) / d_{yz} - d_{yz} / 2a_e \quad (74)$$

et α_e est l'angle formé par la distance sur le grand cercle entre les points w et z , donnée par:

$$\alpha_e = d_{wz} / a_e \quad (75)$$

La distance entre le sommet et le point w est calculée selon que l'obstacle est représenté par un ou plusieurs échantillons du profil:

Pour un obstacle représenté par un seul point:

$$d_{wv} = d_{wx} \quad (76)$$

Pour un obstacle représenté par plusieurs points, il faut se protéger contre de très petites valeurs de la diffraction:

$$d_{wv} = [(\alpha_z + \alpha_e / 2) d_{wz} + h_z - h_w] / \theta \quad \text{pour } \theta \cdot a_e < d_{xy} \quad (77a)$$

$$d_{wv} = (d_x + d_y) / 2 \quad \text{pour } \theta \cdot a_e < d_{xy} \quad (77b)$$

La distance entre le point z et le point du sommet est donnée par:

$$d_{vz} = d_{wz} - d_{wv} \quad (78)$$

La hauteur du sommet au-dessus du niveau de la mer est calculée selon que l'obstacle est représenté par un ou plusieurs échantillons du profil.

Pour un obstacle représenté par un seul point:

$$h_v = h_x \quad (79)$$

Pour un obstacle représenté par plusieurs points:

$$h_v = d_{wv} \alpha_w + h_w + d_{2,wv} / 2a_e \quad (80)$$

2 Paramètres des cylindres

Les paramètres des cylindres (voir la Fig. 8 c)) peuvent maintenant être calculés pour chacun des obstacles définis selon la méthode de la corde tendue:

d_1 et d_2 sont les distances positives entre sommets jusqu'aux obstacles (ou terminaux) respectivement côté émetteur et côté récepteur de l'obstacle,

et:

$$h = h_v + d_{wv} d_{vz} / 2a_e - (h_w d_{vz} + h_z d_{wv}) / d_{wz} \quad (81)$$

Pour calculer le rayon du cylindre on utilise deux autres échantillons du profil:

p : point adjacent à x , côté émetteur,

et:

q : point adjacent à y , côté récepteur

Les indices p et q du profil sont donnés par:

$$p = x - 1 \quad (82)$$

et:

$$q = y + 1 \quad (83)$$

Si un point défini par p ou q est un terminal, la valeur correspondante de h devrait être la hauteur du terrain en ce point et non la hauteur de l'antenne au-dessus du niveau de la mer.

Le rayon du cylindre est calculé comme étant la différence de pente entre le tronçon du profil $p-x$ et le tronçon $y-q$, en tenant compte de la courbure de la Terre, divisée par la distance entre p et q .

Les distances entre échantillons du profil dont on a besoin pour ce calcul sont:

$$d_{px} = d_x - d_p \quad (84)$$

$$d_{yq} = d_q - d_y \quad (85)$$

$$d_{pq} = d_q - d_p \quad (86)$$

La différence de pente entre les tronçons du profil $p-x$ et $y-q$ est exprimée en radians par:

$$t = (h_x - h_p) / d_{px} + (h_y - h_q) / d_{yq} - d_{pq} / a_e \quad (87)$$

où a_e est le rayon équivalent de la Terre.

Le rayon du cylindre est maintenant donné par:

$$R = [d_{pq} / t] [1 - \exp(-4 v)]^3 \quad (88)$$

où v est le paramètre sans dimensions de l'arête à lame de couteau de l'équation (28).

Dans l'équation (88), le deuxième terme est une fonction de lissage empirique appliquée au rayon du cylindre pour éviter les discontinuités dans le cas d'obstacles qui sont marginalement en visibilité directe.

Appendice 2 à l'Annexe 1

Affaiblissements de diffraction sur un sous-trajet

1 Introduction

Le présent Appendice décrit une méthode permettant de calculer l'affaiblissement de diffraction sur un sous-trajet dans le cas d'un tronçon en visibilité directe d'un trajet avec diffraction. Le trajet a été modélisé à l'aide de cylindres en cascade, chacun étant caractérisé par les points du profil w , x , y et z (voir les Fig. 13 et 14). La diffraction sur le sous-trajet sera calculée pour chaque tronçon du trajet total entre les points représentés par w et x , ou par y et z . Ce sont les tronçons en LoS du trajet entre les obstacles ou entre un terminal et un obstacle.

La méthode peut également être utilisée pour un trajet en visibilité directe, avec diffraction sur un sous-trajet, auquel cas elle s'applique à la totalité du trajet.

2 Méthode

Pour une section en visibilité directe du profil entre des échantillons d'indices u et v , la première tâche consiste à identifier l'échantillon du profil entre u et v (mais u et v exclus) qui occulte la plus grande partie de la première zone de Fresnel pour un rayon voyageant de u à v .

Pour éviter de choisir un point qui fait partie de l'un des obstacles du terrain déjà modélisé comme un cylindre, le profil entre u et v est limité à une section entre deux nouveaux échantillons d'indices p et q dont les valeurs sont fixées comme suit:

- $p = u + 1$.
- si $p < v$ et $h_p > h_{p+1}$, augmenter p de 1 et répéter.
- $q = v - 1$.
- Si $q > u$ et $h_q > h_{q-1}$, diminuer q de 1 et répéter.

Si $p = q$ l'affaiblissement dû à l'obstacle sur le sous-trajet est fixé à 0. Sinon, le calcul se fait comme suit.

Il est nécessaire de trouver la valeur minimale du dégagement normalisé C_F donné par h_z/F_1 en unités cohérentes:

h_z : hauteur du rayon au-dessus du point du profil

F_1 : rayon de la première zone de Fresnel.

Le dégagement minimal normalisé peut s'écrire comme suit:

$$C_F = \min_{i=p}^q [(h_z)_i / (F_1)_i] \quad (89)$$

où

$$(h_z)_i = (h_r)_i - (h_t)_i \quad (90)$$

$$(F_1)_i = \sqrt{\lambda \cdot d_{ui} \cdot d_{iv} / d_{uv}} \quad (91)$$

$(h_r)_i$, hauteur du rayon au-dessus d'une droite joignant le niveau de la mer en u et en v au $i^{\text{ième}}$ point du profil est donnée par:

$$(h_r)_i = (h_u \cdot d_{iv} + h_v \cdot d_{ui}) / d_{uv} \quad (92)$$

$(h_t)_i$, hauteur du terrain au-dessus d'une droite joignant le niveau de la mer en u et en v au $j^{\text{ième}}$ point du profil est donnée par:

$$(h_t)_i = h_i + d_{ui} \cdot d_{iv} / 2a_e \quad (93)$$
