

Recommandation UIT-R P.526-16

(11/2025)

Série P: Propagation des ondes radioélectriques

Propagation par diffraction

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.

Droits de propriété intellectuelle

L'UIT attire l'attention sur la possibilité que l'application ou la mise en œuvre de la présente Recommandation puisse donner lieu à l'utilisation d'un droit de propriété intellectuelle. L'UIT ne prend pas position en ce qui concerne l'existence, la validité ou l'applicabilité des droits de propriété intellectuelle, qu'ils soient revendiqués par un membre de l'UIT ou par une tierce partie étrangère à la procédure d'élaboration des Recommandations.

À la date d'approbation de la présente Recommandation, l'UIT avait été avisée de l'existence d'une propriété intellectuelle, protégée par des brevets, dont l'acquisition pourrait être requise pour mettre en œuvre la présente Recommandation. Toutefois, comme il ne s'agit peut-être pas de renseignements les plus récents, il est vivement recommandé aux développeurs de consulter les renseignements pertinents de l'UIT-R concernant les brevets à l'adresse <https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/Pages/itu-r-patent-information.aspx>.

Séries des Recommandations UIT-R

(Egalement disponible en ligne: <https://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, 2026

© UIT 2026

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.526-16*

Propagation par diffraction

(Question UIT-R 202-5/3)

(1978-1982-1992-1994-1995-1997-1999-2001-2003-2005-2007-2009-2012-2013-2018-2019-2025)

Domaine d'application

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.

Mots clés

Diffraction, terrain irrégulier, obstacles, arête en lame de couteau, ouverture, écran

Recommandations UIT connexes

Recommandation UIT-R P.310 – Définitions des termes relatifs à la propagation dans les milieux non ionisés

Recommandation UIT-R P.368 – Méthode de prévision de la propagation de l'onde de sol entre 10 kHz et 30 MHz

Recommandation UIT-R P.834 – Effets de la réfraction troposphérique sur la propagation des ondes radioélectriques

Recommandation UIT-R P.1546 – Méthode de prévision de la propagation point à zone pour les services de Terre entre 30 MHz et 4 000 MHz

NOTE – Il convient d'utiliser l'édition la plus récente de la Recommandation en vigueur.

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

considérant

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

recommande

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.

* La Recommandation UIT-R P.526-15 est incorporée par référence dans le volume 4 de l'édition de 2024 du Règlement des radiocommunications de l'UIT.

Annexe 1

TABLE DES MATIÈRES

Page

1	Introduction	3
2	Notions de base.....	3
2.1	Ellipsoïdes et zones de Fresnel	3
2.2	Largeur de la pénombre	4
2.3	Zone de diffraction	4
2.4	Critère de régularité de la surface des obstacles	4
2.5	Obstacle isolé.....	5
2.6	Types de terrain	5
2.7	Intégrales de Fresnel	5
3	Diffraction sur une Terre sphérique.....	6
3.1	Affaiblissement de diffraction pour des trajets au-delà de l'horizon	7
3.2	Affaiblissement de diffraction pour une distance quelconque à 10 MHz et au-dessus.....	16
4	Diffraction par des obstacles isolés ou sur un trajet terrestre général ou un trajet Terre-espace.....	17
4.1	Obstacle unique à arête en lame de couteau	17
4.2	Obstacle unique de sommet arrondi	21
4.3	Deux arêtes isolées	22
4.4	Plusieurs cylindres isolés	24
4.5	Méthode pour un trajet terrestre général.....	28
4.6	Méthode pour un trajet oblique général Terre-espace	32
5	Diffraction par écrans minces.....	35
5.1	Écran de largeur finie.....	35
5.2	Diffraction par des ouvertures rectangulaires ou par des ouvertures ou des écrans composites	35
6	Diffraction sur un dièdre de conductivité finie.....	39
7	Guide pour la propagation par diffraction	43
	Pièce jointe 1 à l'Annexe 1 – Calcul des paramètres des cylindres	45
1	Angles de diffraction et position du sommet.....	45

2	Paramètres des cylindres	46
	Pièce jointe 2 à l'Annexe 1 – Affaiblissements de diffraction sur un sous-trajet	47
1	Introduction	47
2	Méthode.....	47

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). À 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.

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

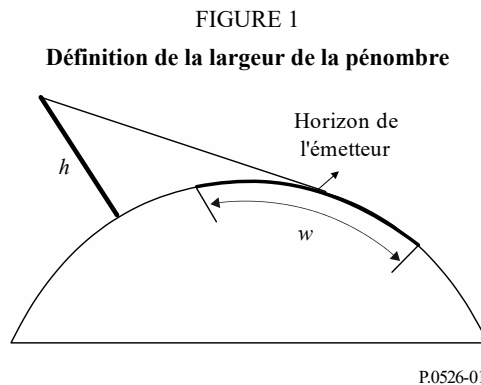
La transition entre la lumière et l'ombre définit la région de la pénombre. Ce passage se fait le long d'une bande étroite (largeur de la pénombre) à la limite de l'ombre géométrique. La Fig. 1 montre la largeur de la pénombre (w) dans le cas d'un émetteur situé à une hauteur h au-dessus d'une Terre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



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:

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

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:

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

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

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. Le logiciel de calcul «LFMF-SmoothEarth» cité dans la Recommandation UIT-R P.368 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).

La méthode de calcul numérique et la méthode de calcul nomographique qui peuvent être utilisées pour les fréquences ≥ 10 MHz sont décrites dans les paragraphes qui suivent. Pour les fréquences inférieures à 10 GHz, il faut toujours utiliser le logiciel «LFMF-SmoothEarth». Les méthodes utilisées pour les trajets au-delà de l'horizon sont données au § 3.1. Une méthode de calcul numérique est décrite au § 3.1.1. Une méthode de calcul nomographique est décrite au § 3.2. La méthode décrite au § 3.2 s'applique à une terre lisse, quelle que soit la distance et pour des fréquences ≥ 10 MHz. Elle fait appel à la méthode numérique décrite au § 3.1.1.

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 paragraphes 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:

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

et

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

ou, en unités pratiques:

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

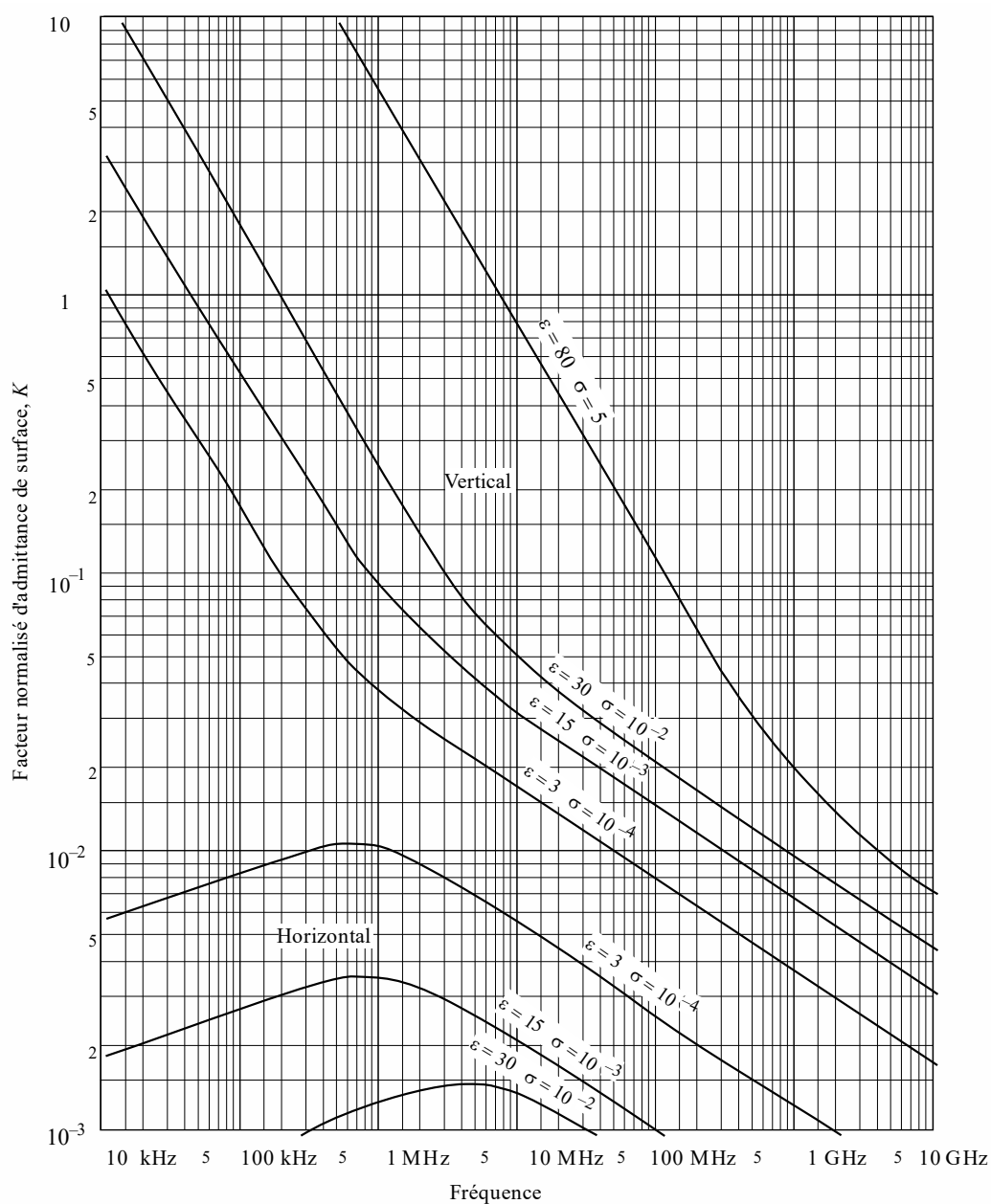
$$K_V = K_H \left[\epsilon^2 + (18\,000 \sigma / f)^2 \right]^{1/2} \quad (12a)$$

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



P.0526-02

Si K est inférieur à 0,001, les caractéristiques électriques de la Terre sont sans influence. Si K est supérieur à 0,001 et inférieur à 1, il convient d'utiliser les formules appropriées données au § 3.1.1.2. Si K est supérieur à 1, la valeur du champ de diffraction calculée à l'aide de la méthode décrite au § 3.1.1.2 diffère des résultats que l'on obtient avec le programme informatique «LFMF-SmoothEarth» et la différence augmente rapidement au fur et à mesure que K augmente. Il convient d'utiliser le logiciel «LFMF-SmoothEarth» lorsque K est supérieur à 1, ce qui se produit uniquement dans le cas d'une polarisation verticale pour des fréquences inférieures à 10 MHz (trajets maritimes) ou inférieures à 200 kHz (trajets terrestres). Dans tous les autres cas, la méthode décrite au § 3.1.1.2 est valable.

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 l'équation suivante:

$$20 \log_{10} \frac{E}{E_0} = F(X) + G(Y_1) + G(Y_2) \quad \text{dB} \quad (13)$$

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:

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

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

soit, en unités pratiques:

$$X = 2,188\beta f^{1/3} \alpha_e^{-2/3} d \quad (14a)$$

$$Y = 9,575 \times 10^{-3} \beta f^{2/3} \alpha_e^{-1/3} h \quad (15a)$$

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:

$$\beta = \frac{1 + 1,6 K^2 + 0,67 K^4}{1 + 4,5 K^2 + 1,53 K^4} \quad (16)$$

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:

$$F(X) = 11 + \log_{10}(X) - 17,6 X \quad \text{pour } X \geq 1,6 \quad (17a)$$

$$F(X) = -20 \log_{10}(X) - 5,6488 X^{1,425} \quad \text{pour } X < 1,6 \quad (17b)$$

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

$$G(Y) \cong 17,6(B - 1,1)^{1/2} - 5 \log_{10}(B - 1,1) - 8 \quad \text{pour } B > 2 \quad (18)$$

$$G(Y) \cong 20 \log_{10}(B + 0,1B^3) \quad \text{pour } B \leq 2 \quad (18a)$$

Si $G(Y) < 2 + 20 \log_{10} K$, prendre $G(Y)$ égal à la valeur $2 + 20 \log_{10} K$.

Dans la formule ci-dessus:

$$B = \beta Y \quad (18b)$$

La précision du champ diffracté donné par l'équation (13) est limitée par l'approximation inhérente au fait que l'on utilise uniquement le premier terme de la série de résidus. La précision donnée par l'équation (13) est meilleure que 2 dB pour les valeurs de X , Y_1 et Y_2 qui sont limitées par la formule:

$$X - (\beta Y_1)^{1/2} \Delta(Y_1, K) - (\beta Y_2)^{1/2} \Delta(Y_2, K) > X_{lim} \quad (19)$$

où:

$$X_{lim} = 1,096 - 1,280(1 - \beta) \quad (19a)$$

$$\Delta(Y, K) = \Delta(Y, 0) + 1,779(1 - \beta) [\Delta(Y, \infty) - \Delta(Y, 0)] \quad (19b)$$

$\Delta(Y, 0)$ et $\Delta(Y, \infty)$ sont donnés par:

$$\Delta(Y, 0) = 0,5 \left[1 + \tanh \left(\frac{0,5 \log(\beta Y) - 0,255}{0,3} \right) \right] \quad (19c)$$

$$\Delta(Y, \infty) = 0,5 \left[1 + \tanh \left(\frac{0,5 \log(\beta Y) + 0,255}{0,25} \right) \right] \quad (19d)$$

En conséquence, la distance minimale d_{min} pour laquelle l'équation (13) est valable, est donnée par:

$$X_{min} = X_{lim} + (\beta Y_1)^{1/2} \Delta(Y_1, K) + (\beta Y_2)^{1/2} \Delta(Y_2, K) \quad (19e)$$

Et d_{min} est calculée à partir de X_{min} selon l'équation (14a).

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:

$$20 \log_{10} \frac{E}{E_0} = F(d) + H(h_1) + H(h_2) \quad \text{dB} \quad (20)$$

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 Figs 3, 4, 5 et 6.

Ces nomogrammes (Figs 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 Figs 3 et 5 et à $f/\sqrt{k}$, pour les Figs 4 et 6.

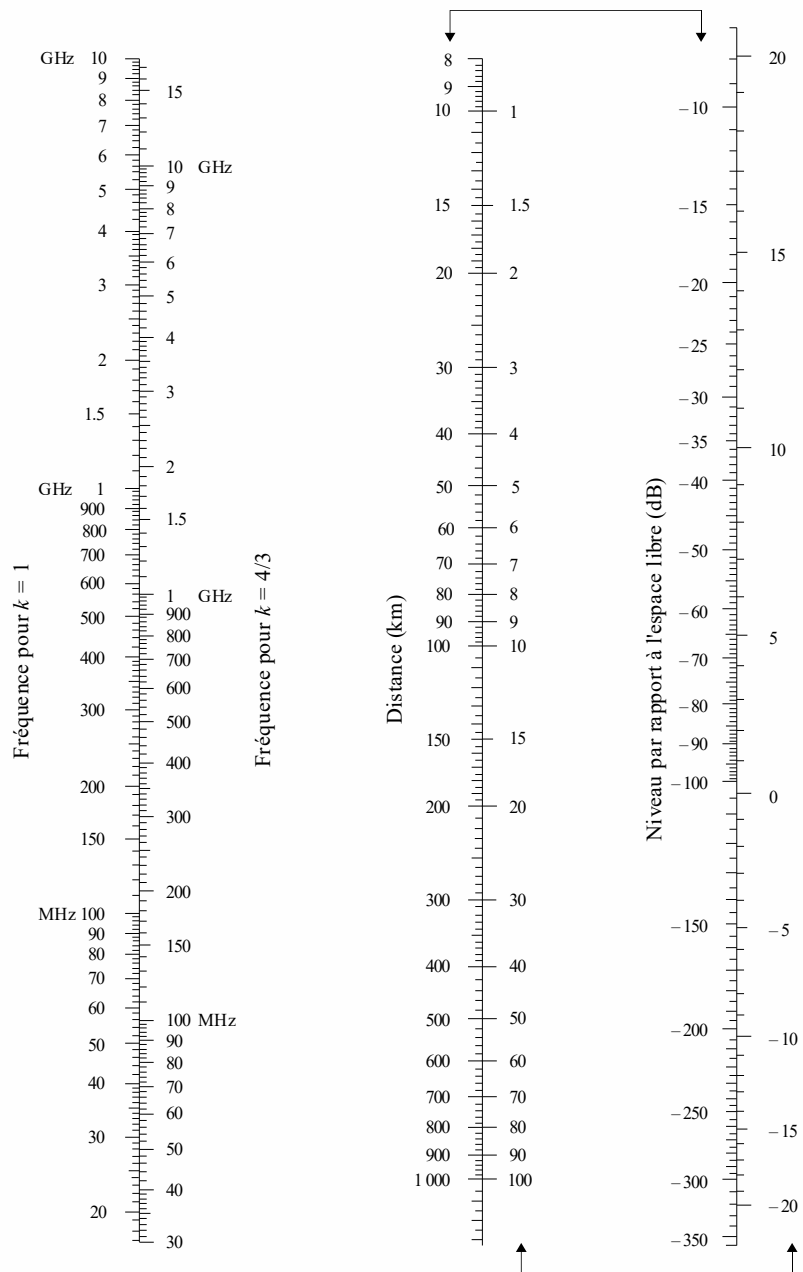
Très près du sol, le champ est pratiquement indépendant de la hauteur. Ce phénomène est surtout important en polarisation verticale sur un trajet maritime. C'est pourquoi la Fig. 6 comporte un segment vertical AB en trait gras. Si la droite d'alignement coupait ce segment vertical limite AB, il faudrait 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 (20). Si la formule (20) donne une valeur supérieure au champ en espace libre, la méthode n'est pas valable.

NOTE 2 – L'effet du segment AB est pris en compte dans la méthode numérique donnée au § 3.1.1.

FIGURE 3

Diffraction sur une Terre sphérique – Effet de la distance



Polarisation horizontale - trajet terrestre et maritime

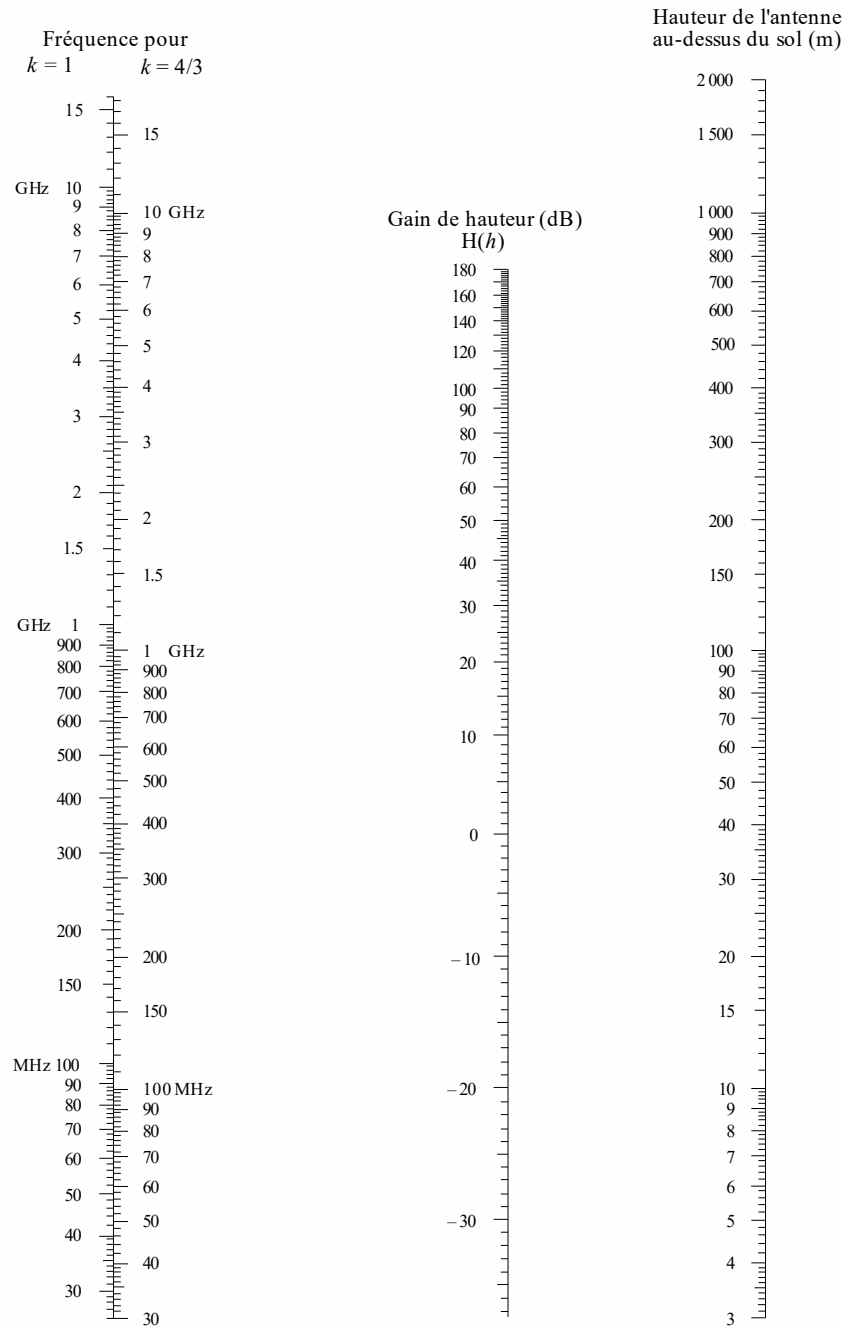
Polarisation verticale - trajet terrestre

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

P.0526-03

FIGURE 4

Diffraction sur une Terre sphérique – Gain de hauteur

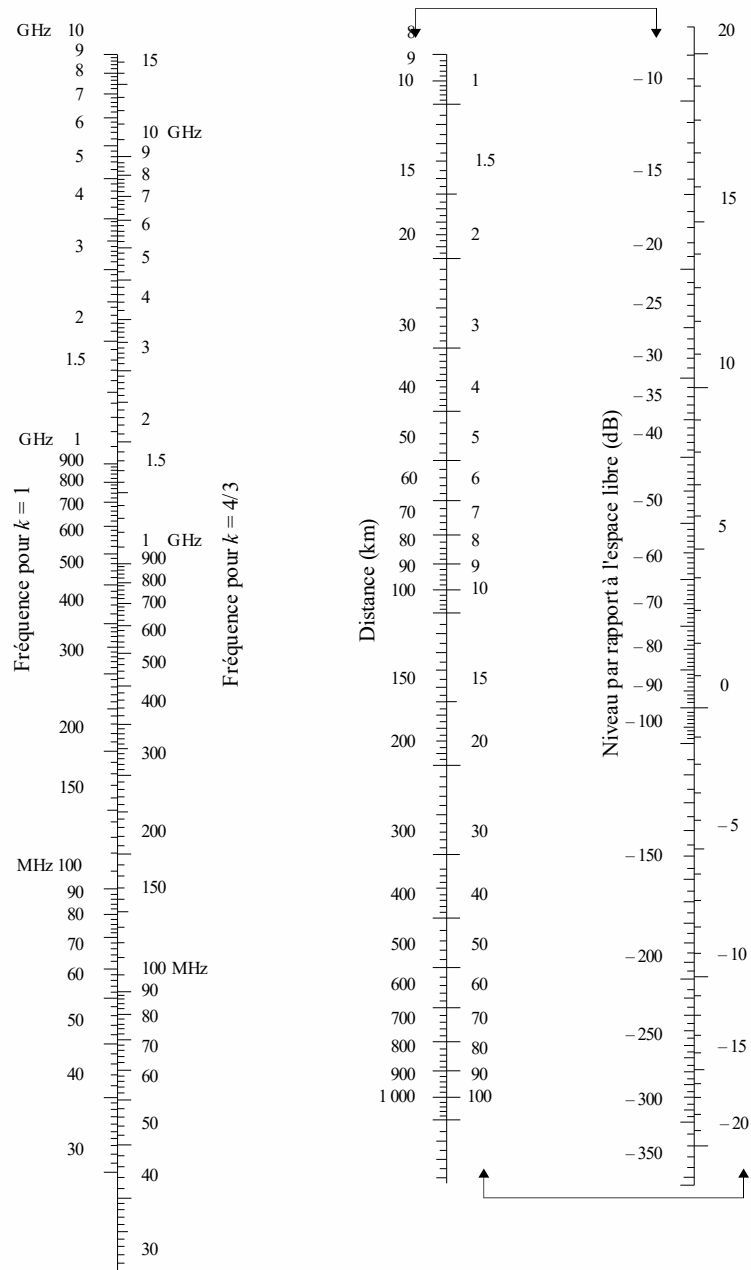


Polarisation horizontale - trajet terrestre et maritime
 Polarisation verticale - trajet terrestre

P.0526-04

FIGURE 5

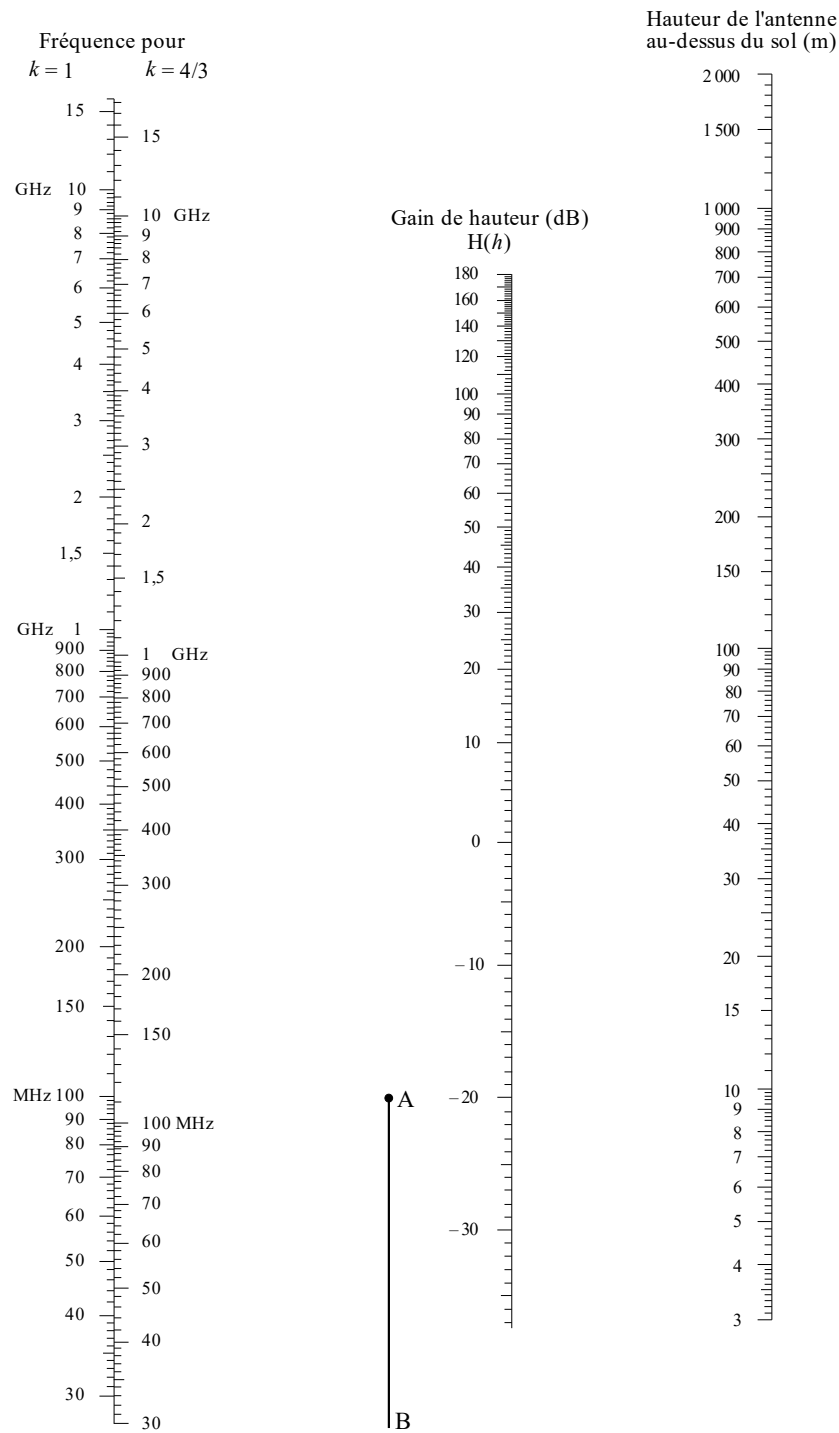
Diffraction sur une Terre sphérique – Effet de la distance



Polarisation verticale - trajet maritime
(Les échelles reliées par des flèches doivent être utilisées conjointement)

P.0526-05

FIGURE 6
Diffraction sur une Terre sphérique – Gain de hauteur



Polarisation verticale – trajet maritime

P.0526-06

3.2 Affaiblissement de diffraction pour une distance quelconque à 10 MHz et au-dessus

Il convient d'utiliser la méthode progressive suivante pour un trajet sur une terre sphérique d'une longueur quelconque, aux fréquences ≥ 10 MHz, pour le rayon équivalent de la Terre $a_e > 0$. La méthode fait appel au calcul exposé au § 3.1.1 dans le cas de trajets transhorizon; sinon on procède par interpolation, en prenant une valeur théorique du rayon équivalent de la Terre.

Cette procédure utilise des unités cohérentes et se déroule comme suit:

Calculer la distance marginale en visibilité directe donnée par:

$$d_{los} = \sqrt{2a_e} (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad (21)$$

Si $d \geq d_{los}$, calculer l'affaiblissement de diffraction selon la méthode exposée au § 3.1.1. Aucun autre calcul n'est nécessaire.

Sinon continuer:

Calculer la hauteur de dégagement, h , la plus faible entre le trajet qui suit la courbure de la Terre et le rayon entre les antennes (voir la Fig. 7).

$$h = \frac{\left(h_1 - \frac{d_1^2}{2a_e}\right)d_2 + \left(h_2 - \frac{d_2^2}{2a_e}\right)d_1}{d} \quad (22)$$

$$d_1 = \frac{d}{2} (1 + b) \quad (22a)$$

$$d_2 = d - d_1 \quad (22b)$$

$$b = 2\sqrt{\frac{m+1}{3m}} \cos \left\{ \frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \arccos \left(\frac{3c}{2} \sqrt{\frac{3m}{(m+1)^3}} \right) \right\} \quad (22c)$$

$$c = \frac{h_1 - h_2}{h_1 + h_2} \quad (22d)$$

$$m = \frac{d^2}{4a_e(h_1 + h_2)} \quad (22e)$$

Calculer le dégagement requis pour un affaiblissement de diffraction nul, h_{req} ; donné par:

$$h_{req} = 0,552 \sqrt{\frac{d_1 d_2 \lambda}{d}} \quad (23)$$

Si $h > h_{req}$, l'affaiblissement de diffraction pour le trajet est nul. Aucun autre calcul n'est nécessaire.

Sinon continuer:

Calculer le rayon équivalent de la Terre modifié, a_{em} , qui donne la LoS marginale à la distance d :

$$a_{em} = 0,5 \left(\frac{d}{\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}} \right)^2 \quad (24)$$

Utiliser la méthode exposée au § 3.1.1 pour calculer l'intensité du champ de diffraction par rapport au champ en espace libre sur le trajet, en utilisant le rayon équivalent de la Terre modifié a_{em} en lieu

et place du rayon équivalent de la Terre a_e et calculer l'affaiblissement A_h à l'aide de la formule suivante: $A_h = -20 \log_{10} \frac{E}{E_0}$.

Si A_h est négatif, l'affaiblissement de diffraction pour le trajet est nul et aucun autre calcul n'est nécessaire.

Sinon calculer par interpolation l'affaiblissement de diffraction A (dB) donné par:

$$A = \left[1 - h/h_{req}\right]A_h \quad (25)$$

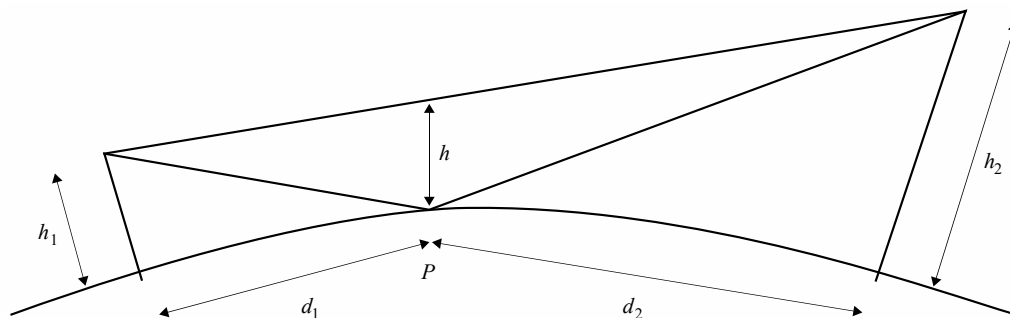
4 Diffraction par des obstacles isolés ou sur un trajet terrestre général ou un trajet Terre-espace

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. Ces modèles ne tiennent pas compte du profil transversalement à la direction de la liaison radioélectrique, qui peut avoir des incidences significatives sur l'affaiblissement de diffraction.

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

P.0526-07

4.1 Obstacle unique à arête en lame de couteau

Dans ce cas extrêmement schématisé (Figs 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:

$$v = h \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)} \quad (26)$$

$$v = \theta \sqrt{\frac{2}{\lambda \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)}} \quad (27)$$

$$v = \sqrt{\frac{2 h \theta}{\lambda}} \quad (v \text{ est du signe de } h \text{ et de } \theta) \quad (28)$$

$$v = \sqrt{\frac{2 d}{\lambda} \cdot \alpha_1 \alpha_2} \quad (v \text{ est du signe de } \alpha_1 \text{ et de } \alpha_2) \quad (29)$$

où:

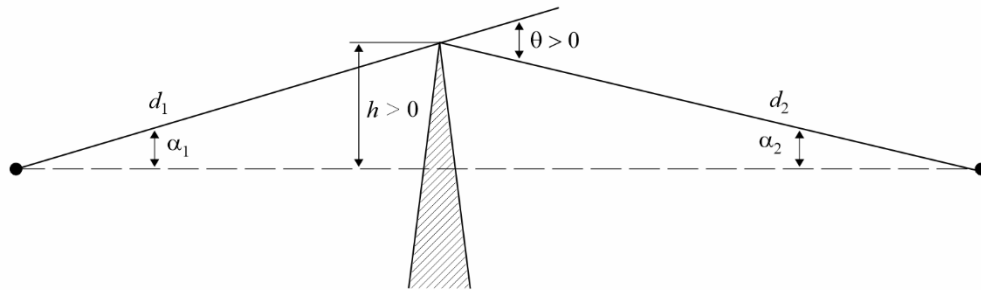
- h : hauteur du sommet de l'arête au-dessus de la droite joignant les deux extrémités du trajet; si le sommet est au-dessous de cette ligne, h est négatif
- d_1, d_2 : distances des deux extrémités du trajet au sommet de l'arête
- d : longueur du trajet
- θ : angle de diffraction (rad); son signe est 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, en radians, séparant, à partir d'une extrémité, le sommet de l'arête et l'extrémité opposée; les signes α_1 et α_2 sont du même signe que h dans les relations ci-dessus.

NOTE 1 – Dans les équations (26) à (29), h, d, d_1, d_2 et λ sont exprimés en unités cohérentes.

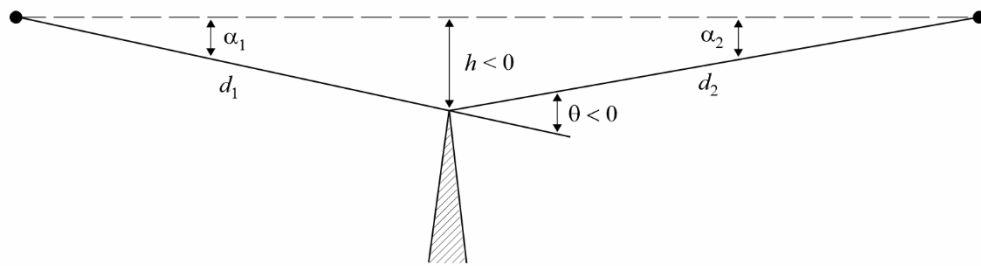
FIGURE 8

Éléments géométriques

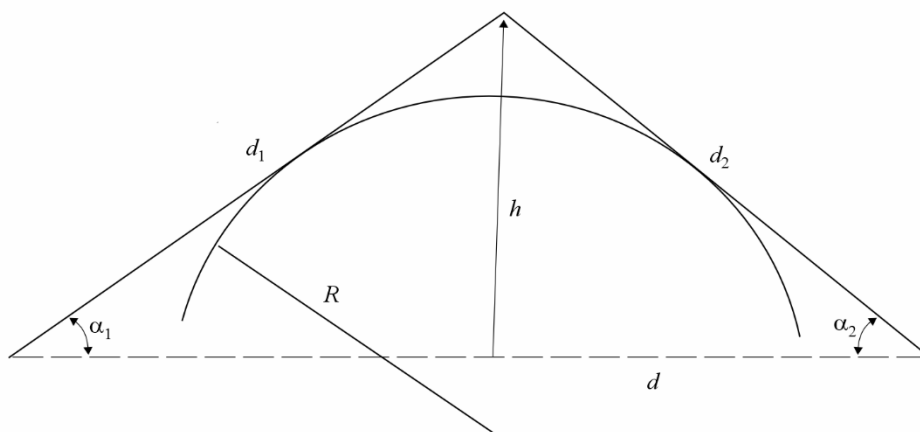
(Pour les définitions de θ , α_1 , α_2 , d , d_1 , d_2 et R , voir les §§ 4.1 et 4.2)



a)



b)



c)

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

$J(v)$ est donné par:

$$J(v) = -20 \log \left(\frac{\sqrt{[1 - C(v) - S(v)]^2 + [C(v) - S(v)]^2}}{2} \right) \quad (30)$$

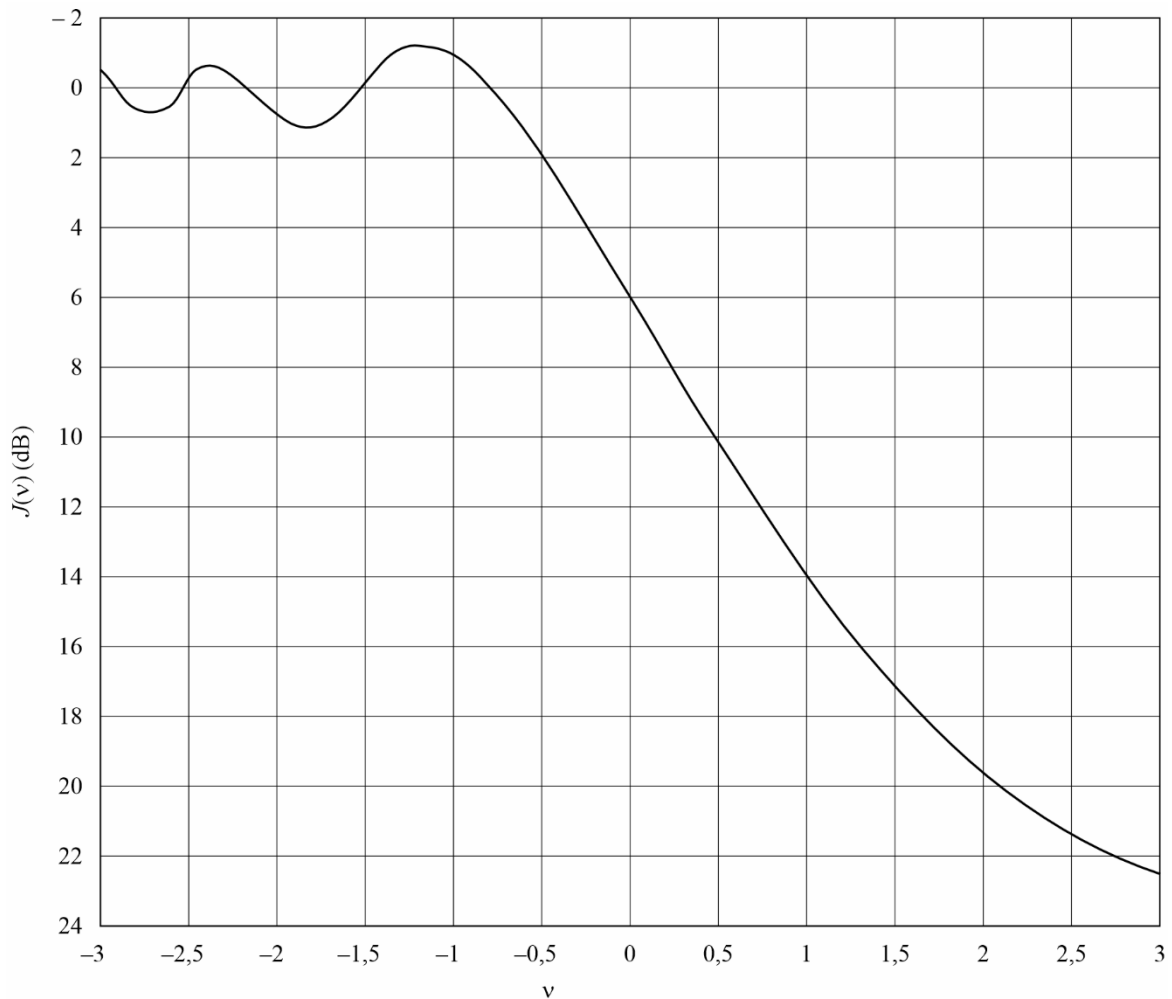
où $C(v)$ et $S(v)$ sont respectivement la partie réelle et la partie imaginaire de l'intégrale complexe de Fresnel $F(v)$ définie au § 2.7.

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

$$J(v) = 6,9 + 20 \log \left(\sqrt{(v - 0,1)^2 + 1} + v - 0,1 \right) \quad \text{dB} \quad (31)$$

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:

$$A = J(v) + T(m, n) \quad \text{dB} \quad (32)$$

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 équations (26) à (29) incluses. À titre d'exemple, en unités pratiques, l'équation (26) donne:

$$v = 0,0316 h \left[\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2} \right]^{1/2} \quad (33)$$

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 l'équation (31). On notera qu'au cas où un obstacle empêche la propagation en visibilité directe, v est positif et que l'équation (31) reste valable.

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

$$T(m, n) = 7,2m^{1/2} - (2 - 12,5n)m + 3,6m^{3/2} - 0,8m^2 \quad \text{dB} \quad \text{pour } mn \leq 4 \quad (34a)$$

$$T(m, n) = -6 - 20 \log(mn) + 7,2m^{1/2} - (2 - 17n)m + 3,6m^{3/2} - 0,8m^2 \quad \text{dB} \quad \text{pour } mn > 4 \quad (34b)$$

et

$$m = R \left[\frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2} \right] \bigg/ \left[\frac{\pi R}{\lambda} \right]^{1/3} \quad (35)$$

$$n = h \left[\frac{\pi R}{\lambda} \right]^{2/3} \bigg/ R \quad (36)$$

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 (32) se réduit au cas de la diffraction par une arête en lame de couteau.

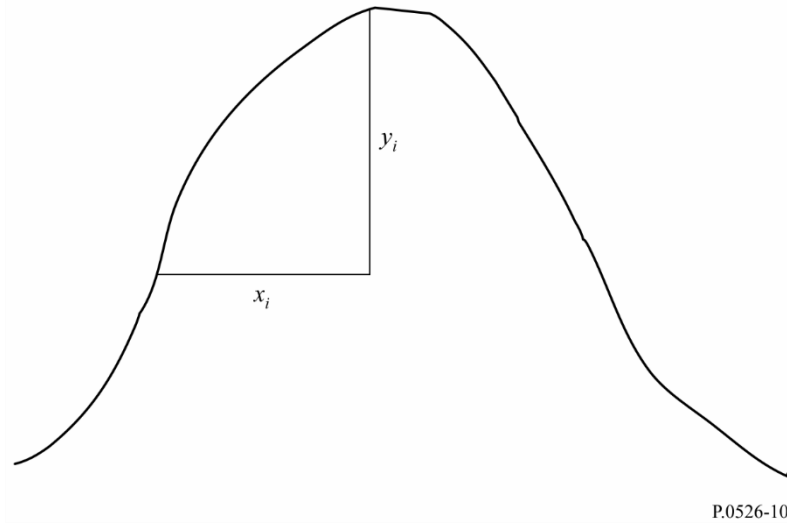
Le rayon de courbure de l'obstacle correspond au rayon de courbure du sommet d'une parabole ajustée au profil de l'obstacle, à proximité du sommet. Lorsqu'on ajuste la parabole, la distance verticale maximale depuis le sommet à utiliser dans cette méthode devrait être de l'ordre du rayon de la première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

$$y_i = \frac{x_i^2}{2r_i} \quad (37)$$

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:

$$r = \frac{1}{N} \sum_1^N \frac{x_i^2}{2y_i} \quad (38)$$

FIGURE 10
Profil vertical de l'obstacle



P.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:

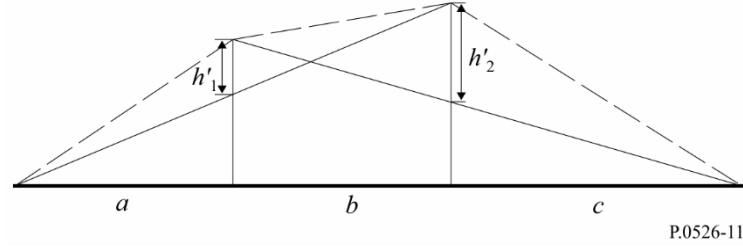
$$L_c = 10 \log_{10} \left[\frac{(a+b)(b+c)}{b(a+b+c)} \right] \quad (39)$$

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:

$$L = L_1 + L_2 + L_c \quad (40)$$

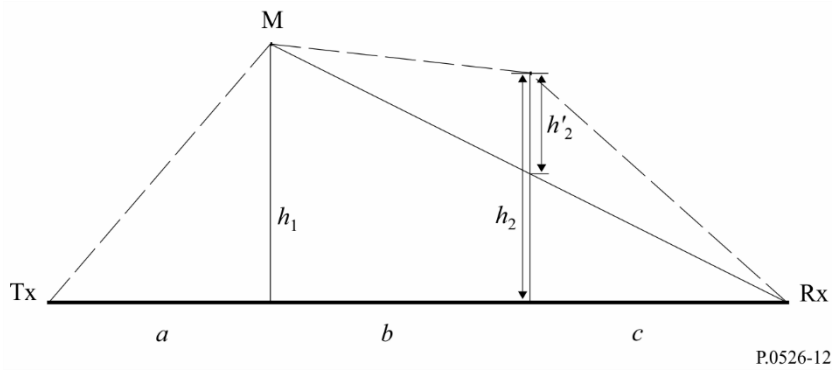
La méthode ci-dessus s'avère particulièrement appropriée lorsque les deux arêtes conduisent à des affaiblissements similaires.

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:

$$T_c = \left[12 - 20 \log_{10} \left(\frac{2}{1 - \frac{\alpha}{\pi}} \right) \right] \left(\frac{q}{p} \right)^{2p} \quad (41)$$

où:

$$p = \left[\frac{2}{\lambda} \frac{(a+b+c)}{(b+c)a} \right]^{1/2} h_1 \quad (42a)$$

$$q = \left[\frac{2}{\lambda} \frac{(a+b+c)}{(a+b)c} \right]^{1/2} h_2 \quad (42b)$$

$$\tan \alpha = \left[\frac{b(a+b+c)}{ac} \right]^{1/2} \quad (42c)$$

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:

$$L = L_1 + L_2 - T_c \quad (43)$$

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 cylindres isolés

Cette méthode est recommandée pour l'estimation de l'affaiblissement de diffraction sur un terrain irrégulier qui présente un ou plusieurs obstacles à la propagation en visibilité directe, où 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.

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. Il convient de tenir compte du gradient du coïndice dans l'atmosphère en utilisant la notion de rayon équivalent de la Terre. 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 ème point;
- d_i distance entre l'émetteur et le i ème point;
- d_{ij} distance entre le i ème et le j ème 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 ème échantillon du profil ($i > s$) est donné par:

$$e = [(h_i - h_s)/d_{si}] - [d_{si}/2a_e] \quad (44)$$

où:

$$\begin{aligned} a_e: & \text{ rayon équivalent de la Terre donné par:} \\ & = k \times 6371 \text{ (km)} \end{aligned}$$

et

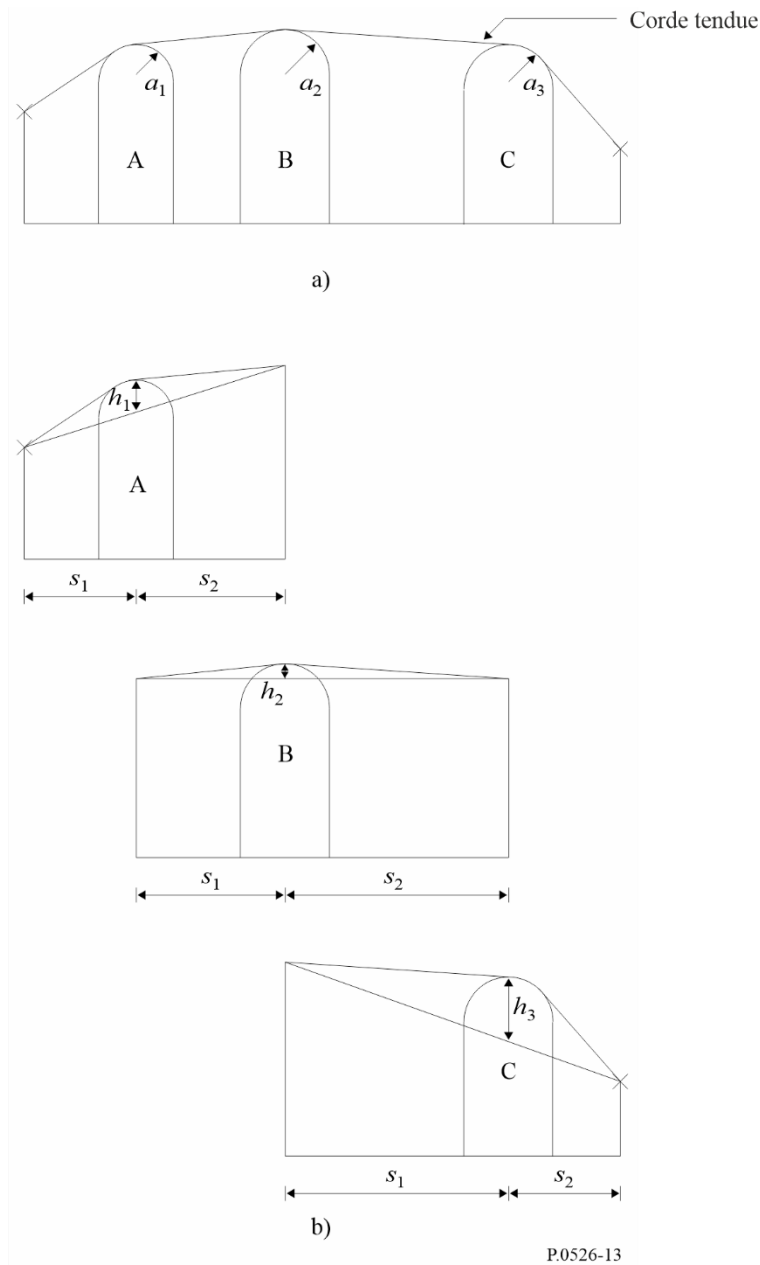
k : coefficient du rayon équivalent de la Terre.

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. 8c). 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. 8c). 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

Modèles 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. 8c). 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.

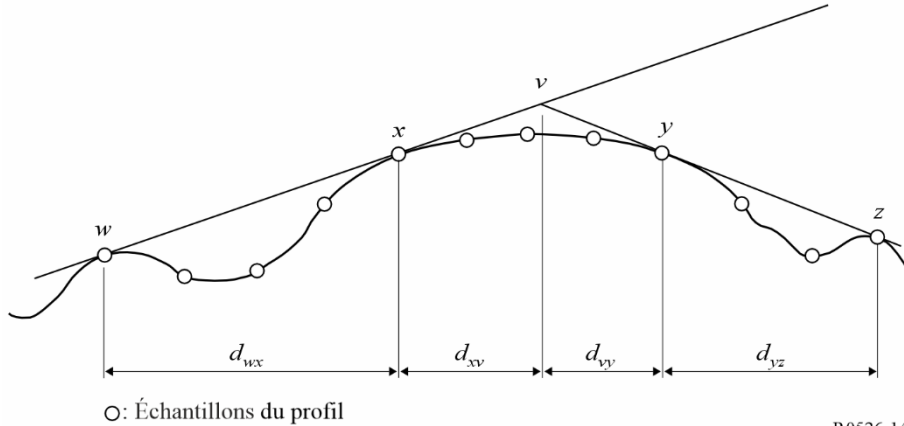
La Figure 14 illustre la géométrie dans le cas d'un obstacle composé de plus d'un point sur la corde. Les points suivants sont indiqués comme suit:

- 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



P.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 la Pièce jointe 1 à l'Annexe 1. Chaque obstacle est caractérisé par w , x , y et z . La méthode de la Pièce jointe 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:

$$L_d = \sum_{i=1}^N L'_i + L''(wx)_1 + \sum_{i=1}^N L''(yz)_i - 20 \log C_N \quad \text{dB} \quad (45)$$

où:

- L'_i : affaiblissement de diffraction sur le i ème cylindre, calculé selon la méthode du § 4.2
- $L''(wx)_1$: affaiblissement de diffraction sur le sous-trajet pour le tronçon du trajet compris entre les points w et x , pour le premier cylindre
- $L''(yz)_i$: 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.

La Pièce jointe 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:

$$C_N = (P_a / P_b)^{0.5} \quad (46)$$

où:

$$P_a = s_1 \prod_{i=1}^N [(s_2)_i] \left(s_1 + \sum_{j=1}^N [(s_2)_j] \right) \quad (47)$$

$$P_b = (s_1)_1 (s_2)_N \prod_{i=1}^N [(s_1)_i + (s_2)_i] \quad (48)$$

et les suffixes dans les crochets renvoient aux différents cylindres.

4.5 Méthode pour un trajet terrestre général

Cette méthode est recommandée dans les cas où l'on a besoin d'un processus automatique pour prévoir l'affaiblissement de diffraction, pour tout type de trajet défini par un profil, en LoS ou transhorizon, que le trajet soit irrégulier ou régulier. Ce modèle est basé sur la construction de Bullington, mais utilise aussi le modèle de diffraction pour une Terre sphérique décrit au § 3.2. Ces modèles sont utilisés conjointement, de sorte que pour un trajet entièrement régulier, les résultats seront les mêmes que dans le cas d'une Terre sphérique.

Le trajet doit être décrit par un profil composé d'échantillons de hauteur du terrain en mètres au-dessus du niveau de la mer pour une série de distances entre les deux terminaux. À la différence du profil requis au § 4.4, le premier et le dernier point du profil considéré, (d_1, h_1) et (d_n, h_n) , doivent donner la hauteur du terrain sous les deux antennes et les hauteurs des antennes au-dessus du sol doivent être fournies séparément.

Dans ce modèle, il n'est pas nécessaire que l'espacement soit le même entre les points du profil. Toutefois, il est important que l'espacement maximal entre les points ne soit pas trop important par rapport à l'espacement des échantillons de données topographiques d'où il est extrait. Il est tout à fait déconseillé de représenter un tronçon du profil de hauteur constante, par exemple une étendue d'eau, par un premier et un dernier points dont l'espacement correspond à la longueur du tronçon plat du trajet. Dans ce modèle, il n'y a pas d'interpolation entre les points du profil et en raison de la courbure de la Terre, une distance importante entre les points du profil, aussi plat soit-il, peut conduire à des erreurs importantes.

Lorsque le profil traverse une zone urbanisée ou arborée, le fait d'ajouter une hauteur représentative de l'obstacle aux hauteurs de terrain pour une Terre nue améliorera, en règle générale, l'exactitude du profil. Cela ne doit pas être fait pour l'emplacement des terminaux (premier et dernier points du profil) et il faut faire attention à proximité des terminaux pour que l'ajout de hauteurs des obstacles n'entraîne pas une augmentation irréaliste des angles d'élévation de l'horizon, tels qu'ils sont vus par chaque antenne. Si un terminal est situé dans une zone où il y a des obstacles mais plus bas que la hauteur représentative des obstacles, il est peut-être préférable de surélever le terminal à la hauteur des obstacles pour pouvoir appliquer ce modèle et d'utiliser un facteur de correction distinct du gain en fonction de la hauteur pour obtenir l'affaiblissement supplémentaire effectivement subi par le terminal dans sa fonction réelle (plus basse).

Il convient d'utiliser cette méthode lorsqu'on ne dispose à priori d'aucune information sur la nature du trajet de propagation ou sur les éventuels obstacles présents le trajet, ce qui est généralement le cas lorsqu'on utilise un programme informatique pour des profils sélectionnés depuis une base de données

de hauteurs de terrain sur une base entièrement automatique, sans examen des caractéristiques du trajet considéré. La méthode donne des résultats fiables pour tous les types de trajet, en LoS ou transhorizon, réguliers ou irréguliers, maritimes ou au-dessus de vastes étendues d'eau.

La méthode comporte deux sous-modèles:

- a) la méthode de diffraction de Bullington utilisée avec un facteur de correction permettant de passer progressivement d'un trajet en LoS à un trajet transhorizon;
- b) la méthode de la Terre sphérique donnée au § 3.2.

La partie Bullington de la méthode est utilisée deux fois. On trouvera ci-après une description générale des calculs de Bullington.

4.5.1 Modèle de Bullington

Dans les équations qui suivent, les pentes sont calculées en m/km par rapport à la ligne de base joignant le niveau de la mer côté émetteur et le niveau de la mer côté récepteur. La distance et la hauteur du i ème point du profil sont respectivement d_i km et h_i m au-dessus du niveau de la mer. L'indice i prend des valeurs comprises entre 1 et n où n est le nombre de points du profil et d km est la longueur totale du trajet. Par commodité, les terminaux situés aux deux extrémités du profil sont appelés émetteur et récepteur et leurs hauteurs respectives en mètres au-dessus du niveau de la mer sont h_{ts} et h_{rs} . La courbure équivalente de la Terre C_e km⁻¹ est donnée par $1/r_e$ où r_e est le rayon équivalent de la Terre en km. La longueur d'onde, en mètres, est λ .

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

$$S_{tim} = \max \left[\frac{h_i + 500C_e d_i (d - d_i) - h_{ts}}{d_i} \right] \quad \text{m/km} \quad (49)$$

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

Calculer la pente de la droite entre l'émetteur et le récepteur dans l'hypothèse d'un trajet LoS:

$$S_{tr} = \frac{h_{rs} - h_{ts}}{d} \quad \text{m/km} \quad (50)$$

Deux cas doivent maintenant être envisagés.

Cas 1. Le trajet est un trajet LoS

Si $S_{tim} < S_{tr}$, le trajet est un trajet LoS.

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

$$v_{\max} = \max \left\{ \left[h_i + 500C_e d_i (d - d_i) - \frac{h_{ts}(d - d_i) + h_{rs}d_i}{d} \right] \sqrt{\frac{0.002d}{\lambda d_i (d - d_i)}} \right\} \quad (51)$$

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

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

$$L_{uc} = J(v_{\max}) \quad \text{dB} \quad (52)$$

où la fonction J est donnée par l'équation (31) pour $v_b > -0,78$ et il est nul dans les autres cas.

Cas 2. Le trajet est un trajet transhorizon

Si $S_{tim} \geq S_{tr}$, le trajet est un trajet transhorizon.

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

$$S_{rim} = \max \left[\frac{h_i + 500C_e d_i (d - d_i) - h_{rs}}{d - d_i} \right] \quad \text{m/km} \quad (53)$$

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

Calculer la distance entre le point de Bullington et l'émetteur:

$$d_b = \frac{h_{rs} - h_{ts} + S_{rim} d}{S_{tim} + S_{rim}} \quad \text{km} \quad (54)$$

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

$$v_b = \left[h_{ts} + S_{tim} d_b - \frac{h_{ts}(d - d_b) + h_{rs} d_b}{d} \right] \sqrt{\frac{0.002d}{\lambda d_b (d - d_b)}} \quad (55)$$

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

$$L_{uc} = J(v_b) \quad \text{dB} \quad (56)$$

Pour L_{uc} calculé à l'aide de l'équation (52) ou (56), l'affaiblissement de diffraction au point de Bullington sur le trajet est maintenant donné par:

$$L_b = L_{uc} + [1 - \exp(-L_{uc}/6)](10 + 0,02d) \quad (57)$$

4.5.2 Méthode complète

Utiliser la méthode décrite au § 4.5.1 pour le profil de terrain et les hauteurs d'antenne réels. Donner à l'affaiblissement de diffraction résultant au point de Bullington pour le trajet réel, L_{ba} en dB, la valeur L_b , telle qu'elle est donnée dans l'équation (57).

Trouver les hauteurs équivalentes de l'émetteur et du récepteur par rapport à une surface régulière ajustée au profil.

Calculer les valeurs initiales provisoires des hauteurs aux extrémités émetteur et récepteur du trajet régulier, comme suit:

$$v_1 = \sum_{i=2}^n (d_i - d_{i-1})(h_i + h_{i-1}) \quad (58)$$

$$v_2 = \sum_{i=2}^n (d_i - d_{i-1})[h_i(2d_i + d_{i-1}) + h_{i-1}(d_i + 2d_{i-1})] \quad (59)$$

$$h_{stip} = \left(\frac{2v_1 d - v_2}{d^2} \right) \quad (60a)$$

$$h_{srip} = \left(\frac{v_2 - v_1 d}{d^2} \right) \quad (60b)$$

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

$$h_{obs} = \max \{h_{obi}\} \quad \text{m} \quad (61a)$$

$$\alpha_{obt} = \max \{h_{obi} / d_i\} \quad \text{mrad} \quad (61b)$$

$$\alpha_{obr} = \max \{h_{obi} / (d - d_i)\} \quad \text{mrad} \quad (61c)$$

où:

$$h_{obi} = h_i - [h_{ts}(d - d_i) + h_{rs}d_i] / d \quad \text{m} \quad (61d)$$

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

Calculer les valeurs provisoires des hauteurs aux extrémités émetteur et récepteur du trajet régulier:

Si h_{obs} est ≤ 0 , alors:

$$h_{stp} = h_{stip} \quad \text{masl} \quad (62a)$$

$$h_{srp} = h_{srip} \quad \text{masl} \quad (62b)$$

sinon:

$$h_{stp} = h_{stip} - h_{obs}g_t \quad \text{masl} \quad (62c)$$

$$h_{srp} = h_{srip} - h_{obs}g_r \quad \text{masl} \quad (62d)$$

où:

$$g_t = \alpha_{obt} / (\alpha_{obt} + \alpha_{obr}) \quad (62e)$$

$$g_r = \alpha_{obr} / (\alpha_{obt} + \alpha_{obr}) \quad (62f)$$

Calculer les valeurs définitives des hauteurs aux extrémités émetteur et récepteur du trajet régulier:

Si h_{stp} est supérieur à h_1 , alors:

$$h_{st} = h_1 \quad \text{masl} \quad (63a)$$

sinon:

$$h_{st} = h_{stp} \quad \text{masl} \quad (63b)$$

Si h_{srp} est supérieur à h_n , alors:

$$h_{sr} = h_n \quad \text{masl} \quad (63c)$$

sinon:

$$h_{sr} = h_{srp} \quad \text{masl} \quad (63d)$$

Utiliser la méthode du § 4.5.1 pour un profil régulier en mettant toutes les hauteurs du profil h_i à zéro, avec des hauteurs d'antenne modifiées:

$$h'_{ts} = h_{ts} - h_{st} \quad \text{masl} \quad (64a)$$

$$h'_{rs} = h_{rs} - h_{sr} \quad \text{masl} \quad (64b)$$

Donner à l'affaiblissement de diffraction résultant au point de Bullington pour un trajet régulier, L_{bs} en dB, la valeur L_b , telle qu'elle est donnée dans l'équation (57).

Utiliser la méthode pour la diffraction sur une Terre sphérique (§ 3.2) pour la longueur du trajet réel d km, avec:

$$h_1 = h'_{ts} \quad \text{m} \quad (65a)$$

$$h_2 = h'_{rs} \quad \text{m} \quad (65b)$$

Donner à l'affaiblissement de diffraction sur une Terre sphérique, L_{sph} en dB, la valeur de A , telle qu'elle est donnée dans l'équation (25).

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

$$L = L_{ba} + \max\{L_{sph} - L_{bs}, 0\} \quad \text{dB} \quad (66)$$

4.6 Méthode pour un trajet oblique général Terre-espace

Cette méthode est recommandée pour prévoir l'affaiblissement de diffraction pour tout type de trajet oblique, tel que défini par un profil dans la région de la portion terrestre du trajet, qu'il s'agisse d'un trajet en visibilité directe ou d'un trajet transhorizon, et que le terrain soit accidenté ou régulier. Il est préférable d'employer cette méthode lorsque l'extrémité supérieure du trajet est beaucoup plus éloignée d'un obstacle que l'extrémité inférieure du trajet. Ce modèle est fondé sur l'affaiblissement pour une arête en lame de couteau de la construction de Bullington, associé à une construction similaire prédisant l'affaiblissement dû à un sol plat pour un trajet général, appelé «modèle effectif pour un sol plat». Une attention particulière est nécessaire à proximité des terminaux pour faire en sorte que la hauteur du relief local n'entraîne pas d'augmentation irréaliste des angles d'élévation de l'horizon par rapport à chaque antenne.

Cette méthode s'est révélée assez précise pour des terrains accidentés qui comportent un obstacle provoquant un affaiblissement de 50 dB maximum par rapport à l'espace libre et pour des terrains réguliers qui comportent un obstacle entraînant un affaiblissement de 30 dB maximum par rapport à l'espace libre. Elle convient donc à tous les trajets Terre-espace dont l'angle d'élévation est compris entre 0 et 90 degrés. Elle peut sous-estimer l'affaiblissement de diffraction pour des angles d'élévation négatifs, en particulier sur terrain régulier.

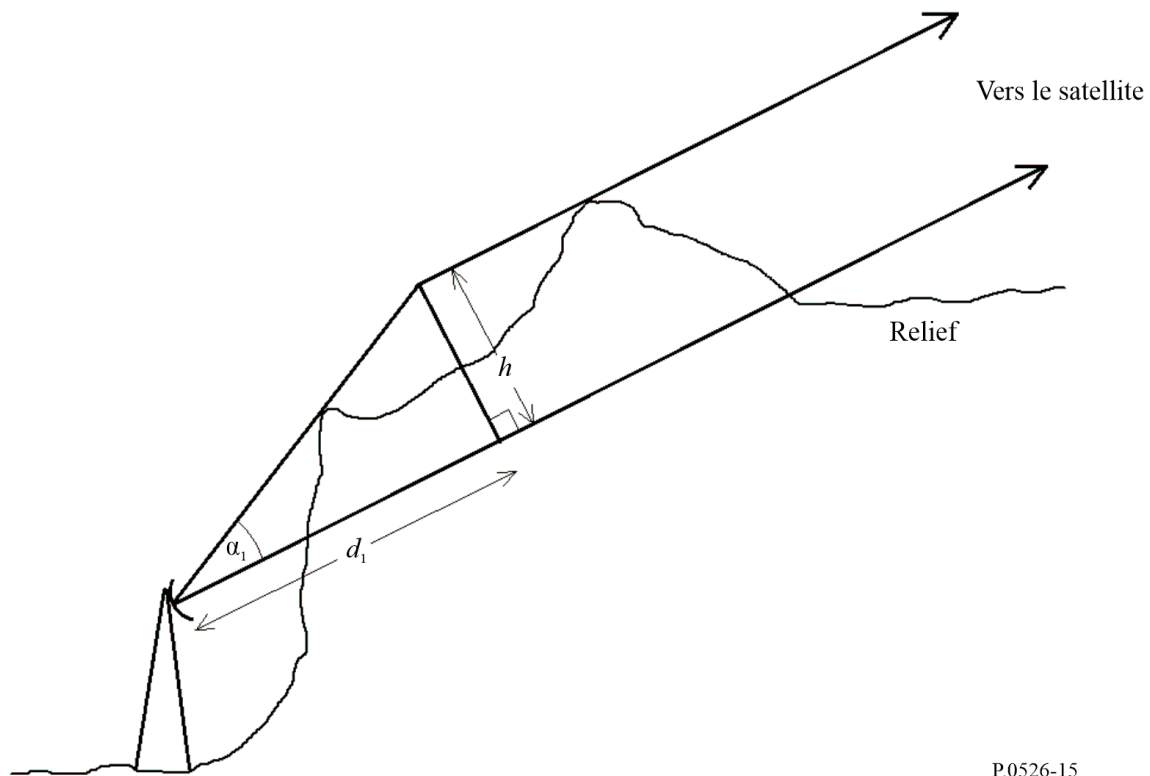
4.6.1 Modèle de Bullington pour un trajet oblique Terre-espace

On peut appliquer la construction triangulaire de Bullington en arête en lame de couteau au relief de la région dans laquelle se situe l'extrémité inférieure d'un trajet oblique dont l'extrémité supérieure est très éloignée, en supposant que les rayons sont parallèles à l'extrémité supérieure, comme le montre la Fig. 15, et qu'un rayon est émis par l'antenne située à l'extrémité inférieure du trajet en direction de l'antenne située à l'extrémité supérieure, et qu'il traverse le terrain si le trajet n'est pas en visibilité directe. Dans ce cas, un autre rayon parallèle à celui-ci est tracé de manière à être tangent au terrain et la distance perpendiculaire h entre ces deux rayons parallèles est utilisée pour calculer le paramètre de diffraction v au moyen de l'équation (26), conjointement avec d_1 comme indiqué à la Fig. 15. Le terme d_2 de l'équation (26) peut être omis s'il est extrêmement grand. Sinon, d_2 est la longueur du reste du trajet direct, et les deux rayons de l'extrémité supérieure du trajet convergent vers l'antenne de l'extrémité supérieure.

Si la ligne de visibilité directe n'est pas obstruée, h est négatif et évalué au point où le dégagement de Fresnel est minimal. La droite h est perpendiculaire au rayon en visibilité directe. Toutes les grandeurs de l'équation (26), à savoir h , d_1 , d_2 et λ sont exprimés dans les mêmes unités.

Après avoir calculé v à l'aide de l'équation (26), l'affaiblissement $J(v)$ pour une arête en lame de couteau de Bullington est estimé à l'aide de l'équation (31), à condition que v soit supérieur à $-0,78$. Autrement, on suppose que $J(v) = 0$ et que l'affaiblissement par diffraction est nul. Si v est supérieur à $-0,78$, il convient de se référer aux §§ 4.6.2 et 4.6.3 pour estimer l'affaiblissement par diffraction dû au terrain.

FIGURE 15
Géométrie de Bullington pour un trajet oblique



P.0526-15

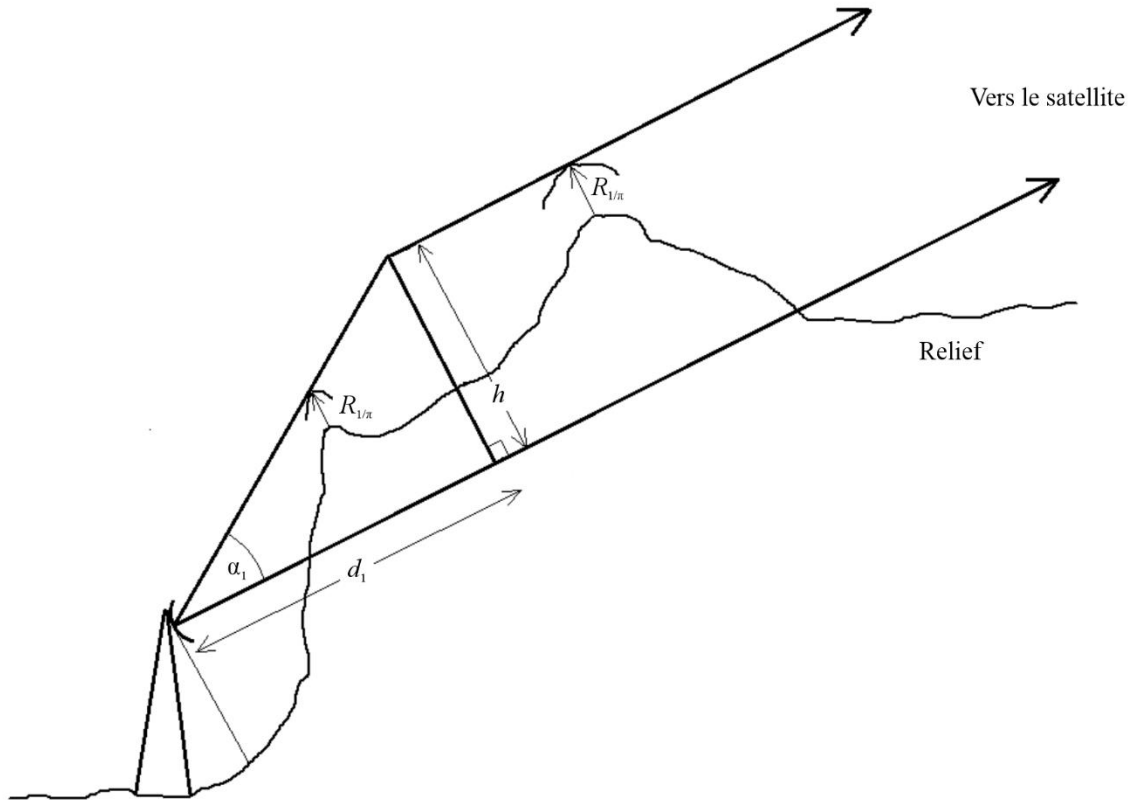
4.6.2 Modèle effectif pour un sol plat

La méthode de calcul de l'affaiblissement pour une arête en lame de couteau du triangle de Bullington décrite au § 4.6.1 est une méthode simple d'estimation de l'affaiblissement de diffraction qui peut être appliquée à n'importe quel terrain arbitraire, mais qui ne peut être considérée comme exacte que dans le cas d'un obstacle comportant une seule arête en lame de couteau. Pour d'autres obstacles, l'affaiblissement $J(v)$ pour une arête en lame de couteau de Bullington est généralement une sous-estimation de l'affaiblissement de diffraction. La méthode suivante permet de remédier à cette lacune, en particulier dans le cas d'un terrain régulier dans la partie inférieure du trajet.

Le modèle effectif pour un sol plat décrit ici est une méthode simple d'estimation de l'affaiblissement de diffraction qui peut être appliquée à n'importe quel terrain arbitraire, mais qui ne peut être considérée comme exacte que dans le cas d'un trajet sur un sol plat présentant un dégagement suffisamment faible pour causer un affaiblissement par diffraction. Dans le cas d'un terrain irrégulier comportant des obstacles, ce modèle simple a tendance à surestimer l'affaiblissement de diffraction, contrairement à l'équation (56) de l'affaiblissement pour une arête en lame de couteau de Bullington, qui tend à sous-estimer l'affaiblissement.

La méthode d'estimation de l'affaiblissement effectif sur un sol plat est une méthode de calcul triangulaire des obstacles, semblable à la construction de Bullington, à ceci près que les points du profil du terrain sont surélevés du rayon de Fresnel d'abord divisé par $1/\sqrt{\pi}$, défini, dans le cas du satellite, par la formule $R_{1/\pi} \approx \sqrt{\lambda d_1/\pi}$ avec des unités cohérentes, dans une direction perpendiculaire à la ligne de rayon directe, avant que les rayons tangents de chaque antenne ne soient trouvés. Cette construction est représentée dans la Fig. 16.

FIGURE 16
Géométrie effective d'un sol plat pour un trajet oblique



P.0526-16

Les angles de ces rayons tangents par rapport à la ligne directe sont de α_1 et α_2 radians. Si la longueur totale du trajet est d et que la longueur d'onde est λ , toutes deux exprimées dans les mêmes unités, l'affaiblissement équivalent dû à un obstacle sur un sol plat par rapport à l'espace libre est donné par la formule suivante:

$$L_e = -40 \log_{10} \left[\sqrt{\pi \alpha_1 \alpha_2 d / \lambda + 1} - \sqrt{\pi \alpha_1 \alpha_2 d / \lambda} \right] \quad (67)$$

Dans le cas d'un trajet oblique de grande longueur, la hauteur h du triangle d'obstacle peut être calculée de manière approximative à l'aide de la formule $h \approx \alpha_2 d$, ce qui conduit à l'expression suivante:

$$L_e \approx -40 \log_{10} \left[\sqrt{\pi \alpha_1 h / \lambda + 1} - \sqrt{\pi \alpha_1 h / \lambda} \right] \quad (68)$$

La hauteur h et l'angle α_1 sont indiqués sur la Fig. 16, le terrain étant ici relevé de $1/\sqrt{\pi}$ par rapport au rayon de la première zone de Fresnel ($R_{1/\pi}$). Par commodité, des distances telles que d_1 peuvent être mesurées dans la direction du rayon direct vers le satellite et des hauteurs telles que h ou $R_{1/\pi}$ doivent être mesurées perpendiculairement au rayon direct.

4.6.3 Modèle complet de trajet oblique

L'affaiblissement pour une arête en lame de couteau de Bullington $J(v)$, décrit au § 4.6.1, et l'affaiblissement effectif pour un sol plat L_e , décrit au § 4.6.2, sont combinés pour donner l'affaiblissement de diffraction L_{eb} comme suit:

$$L_{eb} = k_b J(v) + (1 - k_b) L_e \quad (69)$$

où

$$k_b = \max\left\{\frac{(L_e - 26)}{70}, 0\right\} \quad (70)$$

On a constaté que l'affaiblissement combiné L_{eb} permettait de prévoir avec une précision raisonnable les affaiblissements de diffraction dus au relief de 50 dB maximum s'ajoutant à l'affaiblissement en espace libre sur un terrain irrégulier. Cette méthode peut sous-estimer l'affaiblissement de diffraction dû à un terrain régulier au-delà de la visibilité directe, c'est-à-dire à des angles d'élévation négatifs.

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 Écran 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.

Étape 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 (26) à (29).

Étape 2: Calculer le facteur d'affaiblissement $j(v) = 10^{J(v)/20}$ associé à chaque arête, à partir de l'équation (31).

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

$$J_{min}(v) = -20 \log \left[\frac{1}{j_1(v)} + \frac{1}{j_2(v)} + \frac{1}{j_3(v)} \right] \quad \text{dB} \quad (71)$$

ou, autre façon,

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

$$J_{av}(v) = -10 \log \left[\frac{1}{j_1^2(v)} + \frac{1}{j_2^2(v)} + \frac{1}{j_3^2(v)} \right] \quad \text{dB} \quad (72)$$

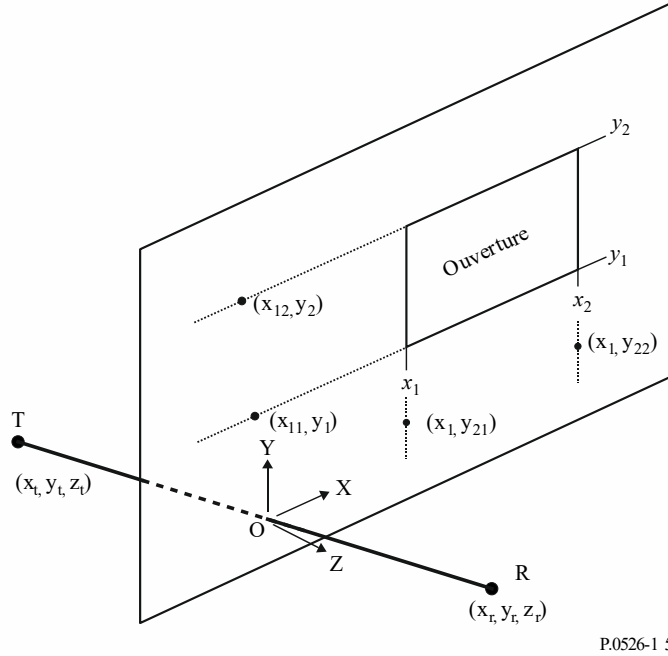
5.2 Diffraction par des ouvertures rectangulaires ou par des ouvertures ou des écrans composites

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 Figure 17 illustre la géométrie utilisée pour représenter une ouverture rectangulaire dans un écran mince infini parfaitement absorbant.

FIGURE 17
Géométrie pour une seule ouverture angulaire



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 (coordonnées x_t, y_t, z_t) et le récepteur R (coordonnées x_r, y_r, z_r) coupe l'écran (plan X-Y), la propagation n'étant pas nécessairement parallèle à l'axe des Z. L'origine est située sur le plan de l'écran.

L'angle θ_p entre la direction de propagation et l'axe des Z est donné par:

$$\theta_p = \arctan \left(\frac{\sqrt{(x_r - x_t)^2 + (y_r - y_t)^2}}{z_r - z_t} \right) \quad \text{rad} \quad (73)$$

Le champ, e_a , au niveau du récepteur, en unités linéaires normalisées pour l'espace libre et sous forme complexe, peut être évalué de manière précise pour les faibles valeurs de l'angle θ_p par la méthode de l'intégrale de Fresnel (§ 5.2.1.1), ou avec une précision raisonnable pour une valeur quelconque de l'angle θ_p par la méthode semi-empirique (§ 5.2.1.2).

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

$$L_a = -20 \log_{10}(|e_a|) \quad \text{dB} \quad (74)$$

5.2.1.1 Méthode de l'intégrale de Fresnel

$$e_a(x_1, x_2, y_1, y_2) = 0,5(C_x S_y + S_x C_y) + j 0,5(S_x S_y - C_x C_y) \quad (75)$$

où:

$$C_x = C(v_{x2}) - C(v_{x1}) \quad (76a)$$

$$C_y = C(v_{y2}) - C(v_{y1}) \quad (76b)$$

$$S_x = S(v_{x2}) - S(v_{x1}) \quad (76c)$$

$$S_y = S(v_{y2}) - S(v_{y1}) \quad (76d)$$

$C(v)$ 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).

Les quatre paramètres de diffraction v_{x1} , v_{x2} , v_{y1} et v_{y2} sont donnés par:

$$v_{x1} = \text{sgn}(x_1) \sqrt{\frac{2}{\lambda} |x_1|^{1,18} \left(\frac{1}{z_r} - \frac{1}{z_t} \right)^{0,18} |\phi_{21}|^{0,82}} \quad (77a)$$

$$v_{x2} = \text{sgn}(x_2) \sqrt{\frac{2}{\lambda} |x_2|^{1,18} \left(\frac{1}{z_r} - \frac{1}{z_t} \right)^{0,18} |\phi_{22}|^{0,82}} \quad (77b)$$

$$v_{y1} = \text{sgn}(y_1) \sqrt{\frac{2}{\lambda} |y_1|^{1,18} \left(\frac{1}{z_r} - \frac{1}{z_t} \right)^{0,18} |\phi_{11}|^{0,82}} \quad (77c)$$

$$v_{y2} = \text{sgn}(y_2) \sqrt{\frac{2}{\lambda} |y_2|^{1,18} \left(\frac{1}{z_r} - \frac{1}{z_t} \right)^{0,18} |\phi_{12}|^{0,82}} \quad (77d)$$

avec:

$$\phi_{21} = \arctan\left(\frac{x_1 - x_r}{z_r}\right) - \arctan\left(\frac{x_1 - x_t}{z_t}\right) \quad \text{rad} \quad (77e)$$

$$\phi_{22} = \arctan\left(\frac{x_2 - x_r}{z_r}\right) - \arctan\left(\frac{x_2 - x_t}{z_t}\right) \quad \text{rad} \quad (77f)$$

$$\phi_{11} = \arctan\left(\frac{y_1 - y_r}{z_r}\right) - \arctan\left(\frac{y_1 - y_t}{z_t}\right) \quad \text{rad} \quad (77g)$$

$$\phi_{12} = \arctan\left(\frac{y_2 - y_r}{z_r}\right) - \arctan\left(\frac{y_2 - y_t}{z_t}\right) \quad \text{rad} \quad (77h)$$

5.2.1.2 Méthode semi-empirique

Pour une valeur quelconque de l'angle θ_p , la méthode suivante, qui ne fait pas appel aux intégrales de Fresnel $C(v)$ et $S(v)$, permet d'obtenir une précision raisonnable:

$$e_a = \prod_{i=1}^2 \left[\text{sgn}(\phi_{i1}) \left(\frac{1}{2} - \frac{ph_{i1}}{Ph} G_{i1} \right) - \text{sgn}(\phi_{i2}) \left(\frac{1}{2} - \frac{ph_{i2}}{Ph} G_{i2} \right) \right] \quad (78)$$

où:

$$G_{ij} = \cos\left(\frac{\phi_{ij}}{2}\right) \left[\frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \arctan(1.4 v_{ij}) \right] \quad (79)$$

les valeurs de ϕ_{ij} étant données par les équations (77e) à (77h), et

$$v_{ij} = 2 \sqrt{\frac{1}{\lambda} (D_{t-proj-ij} + D_{r-proj-ij} - r_{proj-i})} \quad (80)$$

$$r_{proj-i} = \sqrt{(z_r - z_t)^2 + (y_r - y_t)^2} \quad (81a)$$

$$r_{proj-2} = \sqrt{(z_r - z_t)^2 + (x_r - x_t)^2} \quad (81b)$$

$$D_{t-proj-11} = \sqrt{z_t^2 + (y_1 - y_t)^2} \quad (82a)$$

$$D_{t-proj-12} = \sqrt{z_t^2 + (y_2 - y_t)^2} \quad (82b)$$

$$D_{t-proj-21} = \sqrt{z_t^2 + (x_1 - x_t)^2} \quad (82c)$$

$$D_{t-proj-22} = \sqrt{z_t^2 + (x_2 - x_t)^2} \quad (82d)$$

$$D_{r-proj-11} = \sqrt{z_r^2 + (y_1 - y_r)^2} \quad (82e)$$

$$D_{r-proj-12} = \sqrt{z_r^2 + (y_2 - y_r)^2} \quad (82f)$$

$$D_{r-proj-21} = \sqrt{z_r^2 + (x_1 - x_r)^2} \quad (82g)$$

$$D_{r-proj-22} = \sqrt{z_r^2 + (x_2 - x_r)^2} \quad (82h)$$

On évalue D_{11} , D_{12} , D_{21} , D_{22} comme suit:

$$D_{ij} = \sqrt{(z_r)^2 + (y_r - y_{ij})^2 + (x_r - x_{ij})^2} + \sqrt{(z_t)^2 + (y_t - y_{ij})^2 + (x_t - x_{ij})^2} \quad (83)$$

où, si $D_{r-proj-1j} \neq D_{t-proj-1j}$

$$x_{1j} = \frac{x_t (D_{r-proj-1j})^2 - x_r (D_{t-proj-1j})^2 - D_{t-proj-1j} D_{r-proj-1j} (x_t - x_r)}{(D_{r-proj-1j})^2 - (D_{t-proj-1j})^2}, \quad (84a)$$

ou si $D_{r-proj-1j} = D_{t-proj-1j}$

$$x_{1j} = \frac{x_t + x_r}{2}, \quad (84b)$$

et si $D_{r-proj-2j} \neq D_{t-proj-2j}$

$$y_{2j} = \frac{y_t (D_{r-proj-2j})^2 - y_r (D_{t-proj-2j})^2 - D_{t-proj-2j} D_{r-proj-2j} (y_t - y_r)}{(D_{r-proj-2j})^2 - (D_{t-proj-2j})^2}, \quad (85a)$$

ou si $D_{r-proj-2j} = D_{t-proj-2j}$

$$y_{2j} = \frac{y_t + y_r}{2} \quad (85b)$$

et

$$y_{1j} = y_j, x_{2j} = x_j \quad (86)$$

les valeurs de ph_{11} , ph_{12} , ph_{21} , ph_{22} étant données par

$$ph_{ij} = \exp\left(\frac{-j2\pi D_{ij}}{\lambda}\right) \quad (87)$$

et la valeur de Ph étant donnée par:

$$Ph = \exp\left(\frac{-j2\pi r}{\lambda}\right) \quad (88)$$

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

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

Étant donné qu'en unités linéaires normalisées pour l'espace libre (équations (75) ou (78)), 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:

$$e_s = 1,0 - e_a \quad (89)$$

où e_a est calculé en utilisant l'équation (75) ou (78) 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 (75) ou (78).
- On peut obtenir une approximation d'ouvertures ou d'écrans de forme arbitraire en utilisant des combinaisons adéquates d'écrans ou d'ouvertures rectangulaires.
- Étant donné que les intégrales $C(v)$ et $S(v)$ convergent vers $0,5 + j 0,5$ lorsque v tend vers l'infini, l'équation (75) peut être appliquée à des rectangles d'étendue illimitée dans une ou plusieurs directions.

6 Diffraction sur un dièdre de conductivité finie

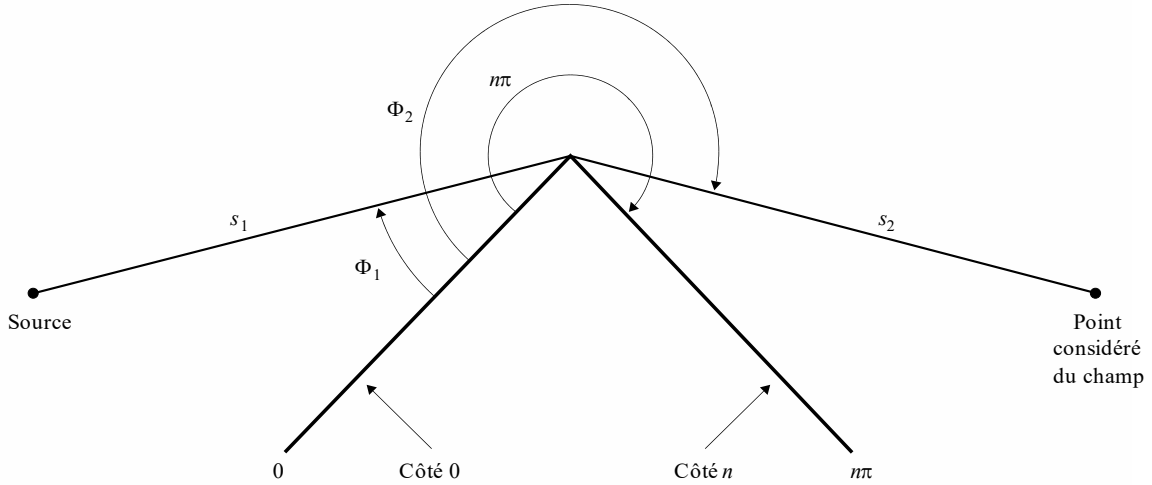
La méthode décrite ci-après peut être utilisée pour prévoir l'affaiblissement de diffraction dû à un dièdre de conductivité finie. Elle peut s'appliquer de manière appropriée pour l'étude de la diffraction par l'angle d'un bâtiment, l'arête d'un toit ou lorsque le terrain peut se caractériser par une 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 Figure 18 illustre la géométrie d'un dièdre de conductivité finie.

FIGURE 18

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



P.0526-1 6

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:

$$e_{TUD} = e_0 \frac{\exp(-jk s_1)}{s_1} D_{||}^{\perp} \cdot \sqrt{\frac{s_1}{s_2(s_1 + s_2)}} \cdot \exp(-jk s_2) \quad (90)$$

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 $2\pi/\lambda$

$D_{||}^{\perp}$: 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:

$$D_{||}^{\perp} = \frac{-\exp(-j\pi/4)}{2n\sqrt{2\pi k}} \left\{ \begin{aligned} & \cot\left(\frac{\pi + (\Phi_2 - \Phi_1)}{2n}\right) \cdot F(kLa^+(\Phi_2 - \Phi_1)) \\ & + \cot\left(\frac{\pi - (\Phi_2 - \Phi_1)}{2n}\right) \cdot F(kLa^-(\Phi_2 - \Phi_1)) \\ & + R_0^{\perp} \cdot \cot\left(\frac{\pi - (\Phi_2 + \Phi_1)}{2n}\right) \cdot F(kLa^-(\Phi_2 + \Phi_1)) \\ & + R_n^{\perp} \cdot \cot\left(\frac{\pi + (\Phi_2 + \Phi_1)}{2n}\right) \cdot F(kLa^+(\Phi_2 + \Phi_1)) \end{aligned} \right\} \quad (91)$$

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:

$$F(x) = 2j\sqrt{x} \cdot \exp(jx) \cdot \int_{\sqrt{x}}^{\infty} \exp(-jt^2) dt \quad (92)$$

$$\int_{\sqrt{x}}^{\infty} \exp(-jt^2) dt = \sqrt{\frac{\pi}{8}}(1 - j) - \int_0^{\sqrt{x}} \exp(-jt^2) dt \quad (93)$$

Cette intégrale peut se calculer par intégration numérique.

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

$$\int_{\sqrt{x}}^{\infty} \exp(-jt^2) dt = \sqrt{\frac{\pi}{2}} A(x) \quad (94)$$

où:

$$A(x) = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{1-j}{2} - \exp(-jx) \sqrt{\frac{x}{4}} \sum_{n=0}^{11} \left[(a_n + jb_n) \left(\frac{x}{4}\right)^n \right] & \text{si } x < 4 \\ -\exp(-jx) \sqrt{\frac{4}{x}} \sum_{n=0}^{11} \left[(c_n + jd_n) \left(\frac{4}{x}\right)^n \right] & \text{dans les autres cas} \end{array} \right\} \quad (95)$$

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

$$L = \frac{s_2 \cdot s_1}{s_2 + s_1} \quad (96)$$

$$a^{\pm}(\beta) = 2 \cos^2 \left(\frac{2n\pi N^{\pm} - \beta}{2} \right) \quad (97)$$

où:

$$\beta = \Phi_2 \pm \Phi_1 \quad (98)$$

Dans l'équation (45), $N^{\pm}$ sont les entiers qui satisfont le mieux à l'équation suivante:

$$N^{\pm} = \frac{\beta \pm \pi}{2n\pi} \quad (99)$$

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

$$R^{\perp} = \frac{\sin(\Phi) - \sqrt{\eta - \cos(\Phi)^2}}{\sin(\Phi) + \sqrt{\eta - \cos(\Phi)^2}} \quad (100)$$

$$R^{\parallel} = \frac{\eta \cdot \sin(\Phi) - \sqrt{\eta - \cos(\Phi)^2}}{\eta \cdot \sin(\Phi) + \sqrt{\eta - \cos(\Phi)^2}} \quad (101)$$

où:

$\Phi = \Phi_1$ pour R_0 et $\Phi = (n\pi - \Phi_2)$ 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 (91) 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:

$$\cot\left(\frac{\pi \pm \beta}{2n}\right) \cdot F(kLa^{\pm}(\beta)) \cong n \cdot \left[\sqrt{2\pi kL} \cdot \text{sign}(\varepsilon) - 2kL\varepsilon \cdot \exp(j\pi/4) \right] \cdot \exp(j\pi/4) \quad (102)$$

où ε est défini par:

$$\varepsilon = \pi + \beta - 2\pi nN^+ \quad \text{pour } \beta = \Phi_2 + \Phi_1 \quad (103)$$

$$\varepsilon = \pi - \beta + 2\pi nN^- \quad \text{pour } \beta = \Phi_2 - \Phi_1 \quad (104)$$

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:

$$e_{LD} = \begin{cases} e_{TUD} + \frac{\exp(-jks)}{s} & \text{pour } \Phi_2 < \Phi_1 + \pi \\ e_{TUD} & \text{pour } \Phi_2 \geq \Phi_1 + \pi \end{cases} \quad (105)$$

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 (91) présentera une singularité et qu'il faudra utiliser l'approximation donnée par l'équation (102).

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 (90) et en calculant:

$$E_{TUD} = 20 \log \left(\left| \frac{s \cdot e_{TUD}}{\exp(-jks)} \right| \right) \quad (106)$$

où:

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

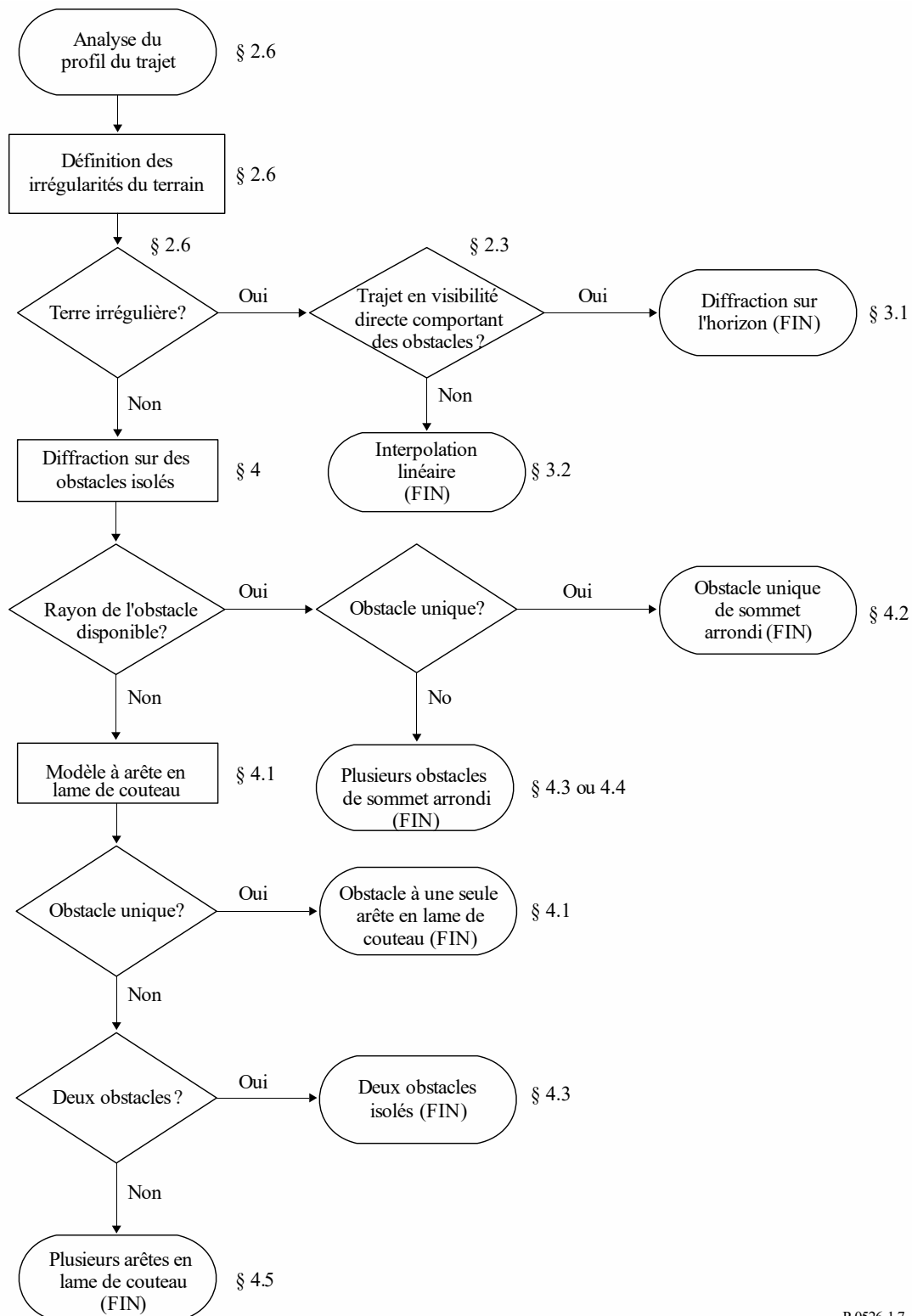
Il convient de noter que pour $n = 2$ et des coefficients de réflexion nuls, cette expression devrait donner les mêmes résultats que la courbe d'affaiblissement de diffraction sur une arête en lame de couteau représentée sur la Fig. 9.

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. 19. Ce diagramme résume la procédure à suivre dans chaque cas.

FIGURE 19
Guide pour la propagation par diffraction



Pièce jointe 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 Figs 8c) 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:

$$\theta = \alpha_w + \alpha_z + \alpha_e \quad (107)$$

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:

$$\alpha_w = \frac{(h_x - h_w)}{d_{wx}} - \frac{d_{wx}}{2a_e} \quad (108)$$

$$\alpha_z = \frac{(h_y - h_z)}{d_{yz}} - \frac{d_{yz}}{2a_e} \quad (109)$$

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

$$\alpha_e = \frac{d_{wz}}{a_e} \quad (110)$$

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:

$$d_{wv} = d_{wx} \quad (111)$$

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

$$d_{wv} = \frac{\left[\left(\alpha_z + \frac{\alpha_e}{2} \right) d_{wz} + h_z - h_w \right]}{\theta} \quad \text{pour } \theta \cdot a_e \geq d_{xy} \quad (112a)$$

$$d_{wv} = \frac{(d_{wx} + d_{wy})}{2} \quad \text{pour } \theta \cdot a_e < d_{xy} \quad (112b)$$

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

$$d_{vz} = d_{wz} - d_{wv} \quad (113)$$

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:

$$h_v = h_x \quad (114)$$

Pour un obstacle représenté par plusieurs points:

$$h_v = d_{wv}\alpha_w + h_w + \frac{d_{wv}^2}{2a_e} \quad (115)$$

2 Paramètres des cylindres

Les paramètres des cylindres (voir la Fig. 8c)) 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:

$$h = h_v + \frac{d_{wv}d_{vz}}{2a_e} - \frac{(h_w d_{vz} + h_z d_{wv})}{d_{wz}} \quad (116)$$

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:

$$p = x - 1 \quad (117)$$

et:

$$q = y + 1 \quad (118)$$

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:

$$d_{px} = d_x - d_p \quad (119)$$

$$d_{yq} = d_q - d_y \quad (120)$$

$$d_{pq} = d_q - d_p \quad (121)$$

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

$$t = \frac{(h_x - h_p)}{d_{px}} + \frac{(h_y - h_q)}{d_{yq}} - \frac{d_{pq}}{a_e} \quad (122)$$

où a_e est le rayon équivalent de la Terre.

Le rayon du cylindre est maintenant donné par:

$$R = \left[d_{pq} / t \right] \left[1 - \exp(-4v) \right]^3 \quad (123)$$

où v est le paramètre sans dimensions de l'arête à lame de couteau de l'équation (32).

Dans l'équation (123), 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.

Pièce jointe 2 à l'Annexe 1

Affaiblissements de diffraction sur un sous-trajet

1 Introduction

La présente Pièce jointe 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 Figs 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:

$$C_F = \min_{i=p}^q [(h_z)_i / (F_1)_i] \quad (124)$$

où

$$(h_z)_i = (h_r)_i - (h_t)_i \quad (125)$$

$$(F_1)_i = \sqrt{\lambda \cdot d_{ui} \cdot d_{iv} / d_{uv}} \quad (126)$$

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

$$(h_r)_i = (h_u \cdot d_{iv} + h_v \cdot d_{ui}) / d_{uv} \quad (127)$$

$(h_t)_i$, hauteur du terrain au-dessus d'une droite joignant le niveau de la mer en u et en v au i ème point du profil est donnée par:

$$(h_t)_i = h_i + d_{ui} \cdot d_{iv} / 2a_e \quad (128)$$

On utilise la valeur minimale du dégagement normalisé pour calculer le paramètre géométrique de diffraction par une arête en lame de couteau dans le cas de l'obstacle le plus important du sous-trajet:

$$v = -C_F \cdot \sqrt{2} \quad (129)$$

L'affaiblissement de diffraction L'' sur le sous-trajet est alors obtenu à partir de l'équation (31) ou de la Fig. 9.

Dans certaines applications, il peut ne pas être souhaitable d'inclure les surchamps provoqués par la diffraction sur un sous-trajet. Dans ce cas, on fixe à zéro la valeur de L'' lorsqu'elle devient négative.
