|  |
| --- |
| **Recommandation UIT-R P.526-11**  **(10/2009)** |
| **Propagation par diffraction** |
| **Série P**  **Propagation des ondes radioélectriques** |

Avant-propos

Le rôle du Secteur des radiocommunications est d’assurer l’utilisation rationnelle, équitable, efficace et économique du spectre radioélectrique par tous les services de radiocommunication, y compris les services par satellite, et de procéder à des études pour toutes les gammes de fréquences, à partir desquelles les Recommandations seront élaborées et adoptées.

Les fonctions réglementaires et politiques du Secteur des radiocommunications sont remplies par les Conférences mondiales et régionales des radiocommunications et par les Assemblées des radiocommunications assistées par les Commissions d’études.

# Politique en matière de droits de propriété intellectuelle (IPR)

La politique de l'UIT‑R en matière de droits de propriété intellectuelle est décrite dans la «Politique commune de l'UIT‑T, l'UIT‑R, l'ISO et la CEI en matière de brevets», dont il est question dans l'Annexe 1 de la Résolution UIT-R 1. Les formulaires que les titulaires de brevets doivent utiliser pour soumettre les déclarations de brevet et d'octroi de licence sont accessibles à l'adresse <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/fr>, où l'on trouvera également les Lignes directrices pour la mise en oeuvre de la politique commune en matière de brevets de l'UIT‑T, l'UIT‑R, l'ISO et la CEI et la base de données en matière de brevets de l'UIT-R.

|  |  |
| --- | --- |
| Séries des Recommandations UIT-R  (Egalement disponible en ligne: <http://www.itu.int/publ/R-REC/fr>) | |
| **Séries** | Titre |
| **BO** | Diffusion par satellite |
| **BR** | Enregistrement pour la production, l'archivage et la diffusion; films pour la télévision |
| **BS** | Service de radiodiffusion sonore |
| **BT** | Service de radiodiffusion télévisuelle |
| **F** | Service fixe |
| **M** | Services mobile, de radiorepérage et d'amateur y compris les services par satellite associés |
| **P** | **Propagation des ondes radioélectriques** |
| **RA** | Radio astronomie |
| **RS** | Systèmes de télédétection |
| **S** | Service fixe par satellite |
| **SA** | Applications spatiales et météorologie |
| **SF** | Partage des fréquences et coordination entre les systèmes du service fixe par satellite et du service fixe |
| **SM** | Gestion du spectre |
| **SNG** | Reportage d'actualités par satellite |
| **TF** | Emissions de fréquences étalon et de signaux horaires |
| **V** | Vocabulaire et sujets associés |

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

*Publication électronique*

Genève, 2011

© UIT 2011

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.526-11

Propagation par diffraction

(Question UIT-R 202/3)

(1978-1982-1992-1994-1995-1997-1999-2001-2003-2005-2007-2009)

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.

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.

## 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:

 (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:

 (2)

soit, en unités pratiques:

 (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:

           m (4)

où

λ: longueur d'onde (m)

*ae*: 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 Δ*h*,

où:

                m (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 Δ*h* (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 0,1*R*, 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:

 (6)

où *j* est l'opérateur complexe égal à  et *C*(ν) et *S*(ν) sont les intégrales de Fresnel en cosinus et en sinus définies par:

 (7a)

 (7b)

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

 (8a)

 (8b)

où:

*x =*0,5π ν2 (9)

et *an, bn, cn* et *dn* 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*(ν) et *S*(ν) peuvent être évalués pour des valeurs négatives de ν en notant que:

*C*(–ν) = – *C*(ν) (10a)

*S*(–ν) = – *S*(ν) (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).

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 GRWAVE. 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, *GT* et *GR*. 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:

pour la polarisation horizontale (11)

et

                 pour la polarisation verticale (12)

ou, en unités pratiques:

 (11a)

 (12a)

où:

*ae*: 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.



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 GRWAVE et la différence augmente rapidement au fur et à mesure que *K* augmente. Il convient d'utiliser le logiciel GRWAVE 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 la formule:

 (13)

où *X* est la longueur normalisée du trajet entre les antennes situées à des hauteurs normalisées *Y*1 et *Y*2 (et où  est en général négatif).

En unités cohérentes:

 (14)

 (15)

soit, en unités pratiques:

 (14a)

 (15a)

où:

*d*: longueur du trajet (km)

*ae*: 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:

 (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:

 (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 (*X*) – 17,6 *X* pour *X* ≥ 1,6 (17a)

*F*(*X*) = –20 log (*X*) – 5,6488*X*1,425 pour *X* < 1,6 (17b)

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

 pour  *Y*  >  2 (18)

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

 pour  10 *K*    <  *Y*  < 2 (18a)

 pour  *K* / 10  <  *Y*  <  10 *K* (18b)

 pour                 *Y*  <  *K* / 10 (18c)

où:

 (18d)

Les équations (18) à (18c) ont été formulées pour *K* < 0,2. Si on utilise ces équations pour *K* > 0,2, il convient de noter que les inégalités définissant l'applicabilité de chaque équation impliquent que l'on passe de l'équation (18) à l'équation (18b) ou (18c) lorsque l'on fait varier la valeur de *Y*, en fonction de la valeur de *K*. Dans ces cas, il y aura une discontinuité dans la valeur de *G* (*Y*) au moment du changement d'équation. Pour les valeurs de *Y* et de *K*, lorsque plus d'une des équations (18) à (18c) sont applicables, en fonction des inégalités, il est recommandé d'utiliser l'équation (18) de préférence aux équations (18a) à (18c). A noter que pour les valeurs de *K* < 0,2, la discontinuité entre les équations (18a) et (18b) peut aller jusqu'à 3 dB.

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:

 (19)

où:

 (19a)

 (19b)

Δ(*Y*,0) et Δ(*Y*,∞) sont donnés par:

 (19c)

 (19d)

En conséquence, la distance minimale *dmin* pour laquelle l'équation (13) est valable, est donnée par:

 (19e)

Et *dmin* est calculée à partir de *Xmin* 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:

                dB (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 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 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.

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









## 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, pour des fréquences ≥ 10 MHz. 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:

 (21)

Si *d* ≥ *dlos*, 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).

 (22)

 (22a)

 (22b)

 (22c)

 (22d)

 (22e)

Calculer le dégagement requis pour un affaiblissement de diffraction nul, *hreq*; donné par:

 (23)

Si *h* > *hreq*, 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, *aem*, qui donne la visibilité directe marginale à la distance *d*:

 (24)

Utiliser la méthode exposée au § 3.1.1 pour calculer l'affaiblissement de diffraction sur le trajet, en utilisant le rayon équivalent de la Terre modifié *aem* en lieu et place du rayon équivalent de la Terre *ae* et appeler cet affaiblissement *Ah*.

Si *Ah* 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:

 (25)

# 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).



## 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 ν et qui peut prendre diverses formes équivalentes, suivant les caractéristiques géométriques choisies:

 (26)

 (27)

 (28)

 (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°

α1, α2: angles séparant, à partir d'une extrémité, le sommet de l'arête et l'extrémité opposée; α1 et α2 sont du signe de *h* dans les relations ci-dessus.

NOTE 1 – Dans les relations (26) à (29), *h*, *d*, *d*1, *d*2 et λ sont exprimés en unités cohérentes.



La Fig. 9 donne l'affaiblissement *J*(ν) (dB) en fonction de ν.

*J*(ν) est donné par:

 (30)

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

Pour une valeur de ν supérieure à −0,78, on peut obtenir une valeur approximative à partir de l'expression:

 (31)



## 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:

 (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 ν peut être évalué à partir de l'une quelconque des relations (26) à (29) incluses. A titre d'exemple, en unités pratiques, la relation (26) donne:

 (33)

où *h* et λ sont en mètres, et *d*1 et *d*2 sont en kilomètres.

On peut obtenir J(ν) à partir de la Fig. 9 ou de la relation (31). On notera qu'au cas où un obstacle empêche la propagation en visibilité directe, ν est positif et que la relation (31) reste valable.

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

                     dB pour  (34a)

     dB   pour  (34b)

et

 (35)

 (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:

 (37)

et *ri* 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:

 (38)



## 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  donne un affaiblissement *L*1 (dB). Le deuxième trajet de diffraction défini par les distances *b* et *c* et la hauteur  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 *Lc* (dB) pour tenir compte de l'écart *b* entre les arêtes. *Lc* peut être évalué à l'aide de la formule suivante:

 (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  +  *Lc* (40)

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



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

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  (hauteur de l'obstacle secondaire par rapport au sous-trajet MR pour calculer l'affaiblissement induit par cette seconde arête). Un terme correctif *Tc* (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:

 (41)

où:

 (42a)

 (42b)

 (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:

 (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 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:

*hi*: hauteur au-dessus du niveau de la mer du *i*ième point

*di*: distance entre l'émetteur et le *i*ième point

*dij*: distance entre le *i*ième et le *j*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*ième échantillon du profil (*i* > *s*) est donné par:

*e* = [(*hi* – *hs*) / *dsi* ] – [*dsi* / 2*ae* ] (44)

où:

*ae*: rayon équivalent de la Terre donné par:

= *k* × 6 371 (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*1et *s*2 soient égales aux distances *d*1 et *d*2 le long de la pente entre les sommets.



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 2

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:

 (45)

où:

*L'i*: affaiblissement de diffraction sur le *i*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

*CN*: 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, *CN*, est calculé à l'aide de:

*CN* = (*Pa* / *Pb*)0,5 (46)

où:

 (47)

 (48)

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 ν, 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 ν*n* (a < n < b) et en sélectionnant le point ayant la plus grande valeur de ν. La valeur de ν associée au *n*e point du profil est donnée par:

 (49)

où:

*h* =  *hn*  +  [*dan* *dnb* / 2 *re*]  –  [(*ha* *dnb*  +  *hb* *dan*)  / *dab*] (49a)

*ha*, *hb*, *hn*: hauteurs (représentées sur la Fig. 15)

*dan*, *dnb*, *dab*: distances horizontales (représentées sur la Fig. 15)

*re*: rayon terrestre équivalent

λ: longueur d'onde

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

L'affaiblissement dû à la diffraction est alors calculé au moyen de la formule (31), qui donne l'affaiblissement *J*(ν) pour une arête en lame de couteau, pour ν > –0,78 et il est nul dans les autres cas.

Il convient de noter que la formule (49) découle directement de la formule (26). Les éléments géométriques intervenant dans la formule (49a) sont illustrés sur la Fig. 15. Le second terme de la formule (49a) est une bonne approximation de la différence de hauteur au point n due à la courbure de la Terre.



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 ν et on désigne par *J*(ν*p*) l'affaiblissement correspondant.

Si ν*p* > – 0,78, on applique la procédure encore deux fois:

– entre l'émetteur et le point p pour obtenir ν*t* et donc *J*(ν*t*);

– entre le point p et le récepteur pour obtenir ν*r* et donc *J*(ν*r*).

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

*L*  =  *J*(ν*p*)  +  *T* [ *J*(ν*t*)  +  *J*(ν*r*)  +  *C* ] pour ν*p*  >  – 0,78 (50a)

*L*  =  0 pour ν*p*  ≤  – 0,78 (50b)

où:

*C*: correction empirique

*C*  =  10,0  +  0,04 *D* (51)

*D*: longueur totale du trajet (km)

et

*T*  =  1,0  –  exp [ –*J*(ν*p*) / 6,0 ] (52)

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 β0% d'une année moyenne, pour laquelle on utilise un facteur de courbure de la Terre égal à 3. Le paramètre β0 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 β0 et 50%. Toutefois, pour le calcul de l'affaiblissement de diffraction pendant β0% 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 β0 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 ν pour chacune des trois arêtes en lame de couteau (sommet, côté gauche et côté droit) en utilisant l'une des équations (26) à (29).

*Etape 2:*Calculer le facteur d'affaiblissement *j*(ν) = 10*J*(ν)/20 associé à chaque arête, à partir de l'équation (31).

*Etape 3:*Calculer l'affaiblissement de diffraction minimal *Jmin* comme suit:

                dB (53)

ou, autre façon,

*Etape 4:*Calculer l'affaiblissement de diffraction moyen *Jav* à partir de:

 (54)

## 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, *ea*, au niveau du récepteur, en unités linéaires normalisées pour l'espace libre, est donné sous une forme complexe par:

*ea*(*x*1,*x*2,*y*1,*y*2) = 0,5(*Cx* *Cy* – *Sx* *Sy*) + j 0,5 (*Cx* *Sy* + *Sx* *Cy*) (55)

où:

*Cx*= *C*(ν*x*2) – *C*(νx1) (56a)

*Cy*= *C*(ν*y*2) – *C*(ν*y*1) (56b)

*Sx*= *S*(ν*x*2) – *S*(ν*x*1) (56c)

*Sy*= *S*(ν*y*2) – *S*(ν*y*1) (56d)

Les quatre valeurs de ν sont celles données par l'équation (26) en remplaçant *h* successivement par *x*1, *x*2, *y*1 et *y*2, et *C*(ν) et *S*(ν) 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, *La*, est donné par:

*La*= – 20 log (*ea*)                dB (57)

### 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, *es*, dû à un seul écran rectangulaire (isolé du sol) est donné par:

*es*= 1,0 – *ea* (58)

où *ea* est calculé en utilisant l'équation (55) 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 (55) ou (58).

– 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*(ν) et *S*(ν) convergent vers 0,5 + j 0,5 lorsque ν 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.



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:

 (59)

où:

*eTUD*: 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 2π*/*λ

**: 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:

 (60)

où:

Φ1: angle d'incidence, mesuré à partir du côté incident (côté 0)

Φ2: 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*π (rad))

j = 

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

 (61)

 (62)

Cette intégrale peut se calculer par intégration numérique.

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

 (63)

où:

 (64)

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

 (65)

 (66)

où:

 (67)

Dans l'équation (41),  sont les entiers qui satisfont le mieux à l'équation suivante:

 (68)

 sont les coefficients de réflexion pour la polarisation perpendiculaire et la polarisation parallèle. Ils sont donnés par:

 (69)

 (70)

où:

Φ = Φ1  pour *R*0 et Φ = (*n*π – Φ2) pour *Rn*

η = ε*r* – j × 18 × 109 σ / *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 (60) présente une singularité.

 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:

 (71)

où ε est défini par:

                pour     (72)

                pour     (73)

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 *eLD* dû au rayon diffracté, auquel s'ajoute le rayon en visibilité directe pour , est donné par:

 (74)

où:

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

Il convient de noter que lorsque , le second terme en cotangente de l'équation (60) présentera une singularité et qu'il faudra utiliser l'approximation donnée par l'équation (71).

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 (59) et en calculant:

 (75)

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.



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:

θ = α*w* + α*z* + α*e* (76)

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:

α*w* = (*hx* – *hw*) / *dwx* – *dwx* / 2*ae* (77)

α*z* = (*hy* – *hz*) / *dyz* – *dyz* / 2*ae* (78)

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

α*e* = *dwz* / *ae* (79)

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:

*dwv* = *dwx* (80)

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

*dwv* = [(α*z* + α*e* / 2) *dwz* + *hz* – *hw* ] / θ pour θ ·*ae* < *dxy* (81a)

*dwv* = (*dwx* + *dwy*) / 2 pour θ ·*ae* < *dxy* (81b)

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

*dvz* = *dwz* – *dwv* (82)

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:

*hv* = *hx* (83)

Pour un obstacle représenté par plusieurs points:

*hv* = *dwv* α*w* + *hw* +  / 2*ae* (84)

# 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* = *hv* + *dwv* *dvz* / 2*ae* – (*hw* *dvz* + *hz* *dwv*) / *dwz* (85)

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 (86)

et:

*q* = *y* + 1 (87)

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:

*dpx* = *dx* – *dp* (88)

*dyq* = *dq* – *dy* (89)

*dpq* = *dq* – *dp* (90)

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

*t* = (*hx* – *hp*) / *dpx* + (*hy* – *hq*) / *dyq* – *dpq* / *ae* (91)

où *ae* est le rayon équivalent de la Terre.

Le rayon du cylindre est maintenant donné par:

 (92)

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

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 *hp* > *hp*+1, augmenter *p* de 1 et répéter.

– *q* = *v* – 1.

– Si *q* > *u* et *hq* > *hq*–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 *CF* donné par *hz*/*F*1 en unités cohérentes:

*hz*: 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:

 (93)

où

(*hz*)*i* = (*hr*)*i* – (*ht*)*i* (94)

 (95)

(*hr*)*i*, hauteur du rayon au-dessus d'une droite joignant le niveau de la mer en *u* et en *v* au *i*ièmepoint du profil est donnée par:

(*hr*)*i* = (*hu* · *div* + *hv* · *dui*) / *duv* (96)

(*ht*)*i*, hauteur du terrain au-dessus d'une droite joignant le niveau de la mer en *u* et en *v* au *j*ièmepoint du profil est donnée par:

(*ht*)*i* = *hi* + *dui* · *div* / 2*ae* (97)

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:

 (98)

L'affaiblissement de diffraction *L"* sur le sous-trajet est alors obtenu à partir de l'expression (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.