

## RECOMMANDATION UIT-R F.1096

**MÉTHODES DE CALCUL DU BROUILLAGE EN VISIBILITÉ DIRECTE DES FAISCEAUX HERTZIENS COMPTE TENU DE LA DIFFUSION PAR LE TERRAIN\***

(Question UIT-R 129/9)

(1994)

L'Assemblée des radiocommunications de l'UIT,

*considérant*

- a) que le brouillage produit par d'autres faisceaux hertziens et par d'autres services risque d'affecter la qualité de fonctionnement d'un système hertzien en visibilité directe;
- b) que la puissance du signal de l'antenne émettrice d'un système peut se propager en visibilité directe dans le plan d'un grand cercle et provoquer le brouillage de l'antenne réceptrice d'un autre système;
- c) que la puissance du signal de l'antenne émettrice d'un système peut se propager sous l'effet d'un phénomène de diffusion par des objets naturels ou artificiels présents à la surface de la Terre et provoquer le brouillage de l'antenne réceptrice d'un autre système;
- d) que les zones du terrain qui provoquent ce couplage brouilleur ne sont pas nécessairement à proximité immédiate d'un trajet le long du grand cercle, mais sont obligatoirement en visibilité directe tant de l'antenne émettrice brouilleuse, que de l'antenne réceptrice du système brouillé;
- e) que la fraction de la puissance de brouillage qui résulte du phénomène de diffusion par le terrain peut dépasser notablement la puissance brouilleuse qui suit le trajet d'une antenne à l'autre le long du grand cercle;
- f) que des méthodes efficaces de calcul de la puissance brouilleuse diffusée par le terrain ont été mises au point,

*recommande*

**1.** que les effets de la diffusion par le terrain soient pris en compte, le cas échéant, dans les calculs de la puissance de brouillage, lorsqu'il y a brouillage de l'antenne réceptrice d'un système par les signaux de l'antenne émettrice d'un autre système et lorsqu'on se trouve simultanément ou non dans l'un des cas suivants (Note 1):

**1.1** il existe un trajet de propagation en visibilité directe entre l'antenne émettrice du système brouilleur et l'antenne réceptrice du système brouillé;

**1.2** des objets naturels ou artificiels présents à la surface du sol sont visibles aussi bien de l'antenne émettrice brouilleuse que de l'antenne réceptrice brouillée;

**2.** que les méthodes décrites à l'Annexe 1 soient utilisées pour calculer la part du brouillage imputable à la diffusion par le terrain.

*Note 1* – Les méthodes de calcul décrites dans la présente Recommandation ne prennent pas en compte les phénomènes de réflexion spéculaire et de propagation par diffraction.

---

\* La méthode de prévision, préconisée dans la Recommandation UIT-R PN.452 établie par la Commission d'études 3 des radiocommunications (ex-Commission d'études 5), pour l'évaluation des brouillages en hyperfréquences entre stations situées à la surface de la Terre et fonctionnant sur des fréquences supérieures à 0,7 GHz environ, est applicable aux autres mécanismes de propagation. La présente Recommandation devrait être portée à l'attention de la Commission d'études 3 des radiocommunications.

## Brouillage des faisceaux hertziens provoqué par la diffusion par le terrain

### 1. Introduction

La diffusion par le terrain s'est avérée un mécanisme particulièrement efficace de couplage brouilleur entre deux systèmes hertziens lorsque deux trajets se croisent et que le terrain à l'intersection est visible à la fois de l'antenne émettrice d'un bond et de l'antenne réceptrice de l'autre. Dans ce cas, les lobes principaux des deux antennes sont couplés dans une zone commune du terrain et le brouillage est similaire à celui créé par les échos de sol reçus par un système radar bistatique.

Dans le passé, les calculs du brouillage entre faisceaux hertziens utilisaient le mécanisme de propagation selon un arc proche de l'arc de grand cercle, qui comprend les trajets en visibilité directe, les effets de la réfraction atmosphérique, la diffraction par la surface de la Terre et la diffusion troposphérique. Ces techniques selon l'arc de grand cercle, combinées à un couplage des lobes latéraux de l'antenne ont permis par ailleurs pendant de nombreuses années à certaines administrations de déterminer les brouillages à l'intérieur des systèmes et entre systèmes dans les faisceaux hertziens de Terre. D'après les mesures faites ces dernières années, la propagation sur l'arc du grand cercle contribue souvent pour une moindre part à ce phénomène, par comparaison à la diffusion par le terrain.

Contrairement au brouillage entre systèmes, les écarts entre les prévisions et les mesures sur l'arc du grand cercle se réduisent pour les brouillages à l'intérieur des systèmes, le cas le plus fréquent autrefois étant celui du brouillage entre deux bonds adjacents du même trajet.

Si l'on considère un cas de brouillage impliquant une station terrienne et une station de Terre, le couplage peut se produire également par l'intermédiaire du faisceau principal de l'antenne de la station de Terre, de la zone au voisinage de la station terrienne, et des lobes latéraux de l'antenne de la station terrienne. Suivant la configuration géométrique en présence, le mécanisme de brouillage dominant est soit la diffusion par le sol, soit le couplage suivant l'arc de grand cercle.

### 2. Modèle mathématique de diffusion par le terrain

La puissance de brouillage  $P_r$  transmise par le mécanisme de la diffusion par le sol depuis une antenne émettrice dont la puissance rayonnante est  $P_t$ , peut être calculée au moyen de la formule relative au radar bistatique:

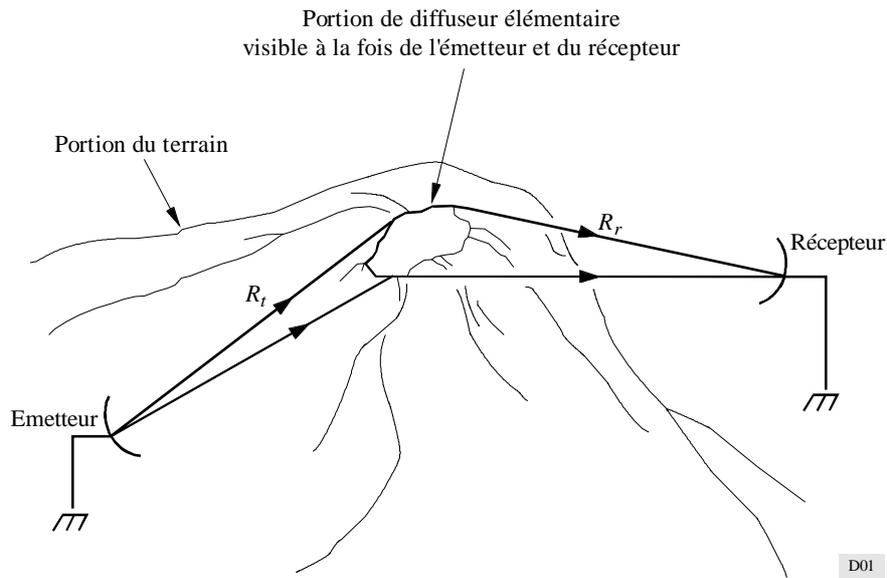
$$P_r = P_t \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \int_{\Omega} \frac{G_t G_r}{R_t^2 R_r^2} \gamma dA_e \quad (1)$$

où les indices  $t$  et  $r$  se rapportent respectivement à l'émetteur et au récepteur,  $G(\theta, \varphi)$ , les valeurs respectives des gains en puissance des antennes dans la direction des diffuseurs de la zone élémentaire de diffusion  $dA_e$ ,  $\theta$  l'azimut et  $\varphi$  l'angle d'élévation, mesurés par rapport à l'axe de l'antenne (voir la Fig. 1),  $R_t$  et  $R_r$  les trajets obliques depuis les antennes jusqu'à l'élément de zone de diffusion,  $\lambda$  la longueur d'onde, et  $\gamma$  le coefficient de diffusion, indiquant la quantité d'énergie incohérente diffusée par l'élément de zone. L'élément de zone  $dA_e$  est la plus petite surface de la zone de diffusion mesurée perpendiculairement aux vecteurs définissant le trajet oblique allant de l'émetteur au récepteur.

La formule (1) suppose l'absence de cohérence des champs diffusés à partir de différents objets ou de différentes zones et sous-entend que la région  $\Omega$  contient toutes les régions élémentaires qui contribuent à la réception de l'énergie diffusée. Dans le calcul de l'intégrale pour une fraction de la surface de la terre, il faut tenir compte de l'occultation de chaque élément de zone; en effet seules les régions non ombragées, visibles de l'antenne émettrice comme de l'antenne réceptrice, y contribueront.

La comparaison des valeurs mesurées et calculées du brouillage a montré qu'il était possible de supposer un coefficient de dispersion modifié  $\gamma$  constant à l'intérieur de zones relativement étendues. Le Tableau 1 donne des valeurs types du coefficient  $\gamma$  qui ont été établies par une administration en ce qui concerne différents couverts terrestres.

FIGURE 1  
Diffusion par le terrain



TABEAU 1

Type de diffuseur	$\gamma$ (dB)
Types de couvert terrestre (base de données des Etats-Unis d'Amérique)	
– quartier résidentiel urbain	–8
– zone de commerces et de services	–7
– forêt à feuilles caduques	–16
– forêt mélangée	–20
Structures artificielles (base de données FAA)	+10,4

L'intégrale permettant de calculer la puissance de brouillage (1) peut être exprimée sous forme d'une somme finie:

$$P_r = C_t \sum_{\Omega} \frac{G_t(p_i) G_r(p_i)}{R_t^2(p_i) R_r^2(p_i)} \gamma_i A_{e,i} \tag{2}$$

$$C_t = P_t \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \tag{3}$$

formule dans laquelle:

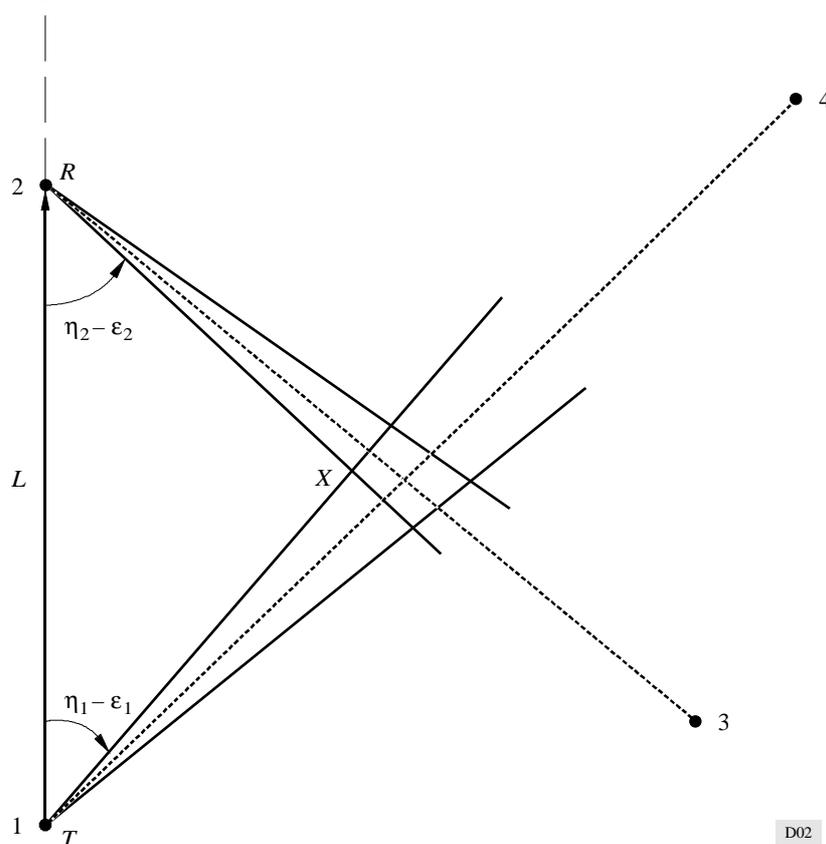
- $\gamma_i$ : coefficient de la  $i$ ème cellule
- $p_i$ : centre de la cellule et
- $A_{e,i}$ : surface équivalente de la  $i$ ème cellule de l'univers de cellules  $\Omega$ .

Les mesures de brouillage faites à une fréquence fixe indiquent généralement des variations en fonction du temps autour de la valeur moyenne calculée à l'aide de la formule (2). Cela vient du mouvement des objets diffusants, tels que les arbres et la végétation, ou de fluctuations dans le temps des conditions atmosphériques, qui peuvent induire des variations d'amplitude et de phase entre les signaux diffusés par les différentes zones de diffusion. De manière analogue, on observe des variations autour de la même valeur moyenne lorsqu'on change la fréquence porteuse utilisée pour l'expérience. Heureusement, dans le cas du brouillage entre faisceaux hertziens numériques, seule la valeur moyenne donnée par la formule (2) est importante. Par ailleurs, si la porteuse de grande intensité d'un signal MF à faible indice est la source de brouillage, il faut alors tenir compte des variations de cette porteuse au-dessus de la valeur moyenne (surchamps).

### 2.1 Application du modèle

Des considérations pratiques de moyens informatiques ont pour effet de limiter les dimensions de la partie de la région  $\Omega$  sur laquelle l'intégrale doit être calculée. Une méthode consiste à prendre comme domaine d'intégration une zone délimitée à la surface de la Terre par un quadrilatère défini par l'intersection d'un secteur azimutal centré sur l'axe de l'antenne émettrice brouilleuse, avec un secteur azimutal centré sur l'axe de l'antenne réceptrice brouillée. La Fig. 2 représente une zone ainsi définie, lorsque le trajet de la station 1 à la station 4 croise celui qui va de la station 3 à la station 2 conduisant au brouillage de la station 2 par la station 1 par diffusion par le terrain. Les secteurs en question seraient centrés sur l'azimut du faisceau principal des antennes correspondantes et pourraient englober les azimuts pour lesquels le gain de directivité dans la direction azimutale reste inférieur, disons de 30 dB, au gain maximum. Le § 3.1 décrit le processus de calcul de l'intégrale de brouillage sur une région ainsi définie.

FIGURE 2  
Géométrie du couplage brouilleur



Les techniques de bornage offrent un moyen moins arbitraire, plus précis et plus efficace pour évaluer la puissance brouilleuse diffusée. Puisque la plus grande partie de l'énergie reçue, préalablement diffusée par le terrain, provient généralement des zones voisines de l'intersection des faisceaux principaux des antennes brouilleuse et brouillée, c'est uniquement au voisinage de cette région qu'une intégration précise est indispensable. Un calcul de borne supérieure permet de déterminer la contribution du reste de l'univers  $\Omega$ . Le § 3.2 montre comment appliquer les techniques de bornage.

Un élément de terrain ne peut avoir une contribution non nulle à l'intégrale de la puissance de brouillage qu'à condition de ne pas être occulté. Autrement dit, il doit obligatoirement être visible à la fois de l'antenne émettrice et de l'antenne réceptrice. L'évaluation de l'occultation d'un élément de zone exige la prise en compte des phénomènes de macro et de micro-occultation. On dit qu'il y a macro-occultation lorsqu'un élément n'est pas visible parce qu'il est caché par un terrain qui le surplombe et qui se trouve plus près de l'une des deux antennes; on dit qu'il y a micro-occultation si l'élément est orienté de telle sorte qu'il ne présente aucune surface équivalente  $A_{e,i}$  vis-à-vis de l'une des deux antennes. La définition des caractéristiques permettant de déterminer s'il y a micro ou macro-occultation d'un élément de terrain figure respectivement aux § 4.1 et 4.2

On suppose ci-dessous qu'il existe des cartes numériques des hauteurs fiables de la zone où se trouve le domaine d'intégration. Ces données se présentent sous la forme des valeurs de hauteurs pour une série de points définis dans des coordonnées géodésiques de latitude et de longitude. Il existe certes des données cartographiques à haute résolution fondées sur des intervalles angulaires de 3 secondes d'arc, mais l'utilisation de données correspondant à des intervalles de 15 secondes d'arc permet d'obtenir une précision adéquate.

Les diagrammes de rayonnement utilisés dans les calculs reposent fréquemment sur des mesures regroupées dans des tables d'exploration informatisées ou peuvent être des expressions analytiques de diagrammes mesurés. A des fins de simplicité, pour obtenir facilement le diagramme d'azimut, il est possible de le faire tourner autour de l'axe de visée.

### 3. Procédures d'intégration

#### 3.1 *Evaluation directe*

La valeur de l'intégrale calculée sur un domaine choisi  $S_0$  peut être évaluée par la formule:

$$P_{r,o} = C_t \sum_{p_i \in S_0} \frac{G_t(p_i) G_r(p_i)}{R_t^2(p_i) R_r^2(p_i)} \gamma_i A_{e,i} \quad (4)$$

dans laquelle les points  $p_i$  appartiennent aux domaines  $A_{e,i}$  qui forment une partition régulière du domaine  $S_0$ :

$$S_0 = \cup_i A_{e,i}, \quad A_{e,i} \cap A_{e,j} = \emptyset \quad \text{pour } i \neq j \quad (5)$$

Bien que les intégrandes soient définies sur une grille orthogonale, l'utilisation de triades de points facilite la définition des domaines élémentaires du plan. Ces triades déterminent des domaines triangulaires groupes de trois points qui servent à définir  $A_{e,i}$ , la zone minimale visible à la fois de l'émetteur et du récepteur:

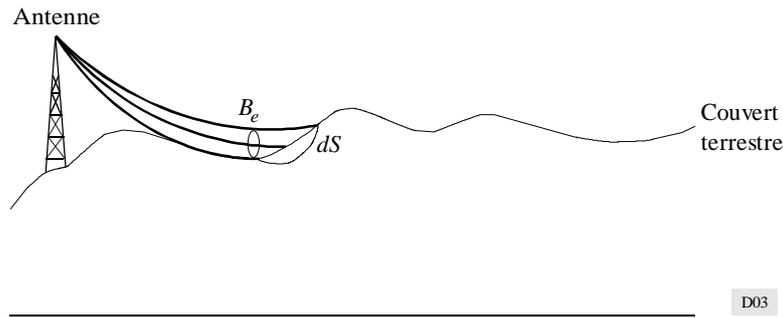
$$A_{e,i} = \min\{A_{t,i}, A_{r,i}\} \quad (6)$$

Si une région est occultée, le terme correspondant n'est pas pris en compte dans l'intégration.

L'élément de zone  $A_{e,i}$  est déterminé par la partie visible de la projection de la surface  $\Delta S_i$  sur le plan perpendiculaire à la direction du rayonnement (voir la Fig. 3).

$$A_{e,i} = \min\{B_{t,i}, B_{r,i}\} \quad (7)$$

FIGURE 3  
Élément diffuseur



D03

La valeur maximale de l'élément de surface visible peut être exprimée par la formule:

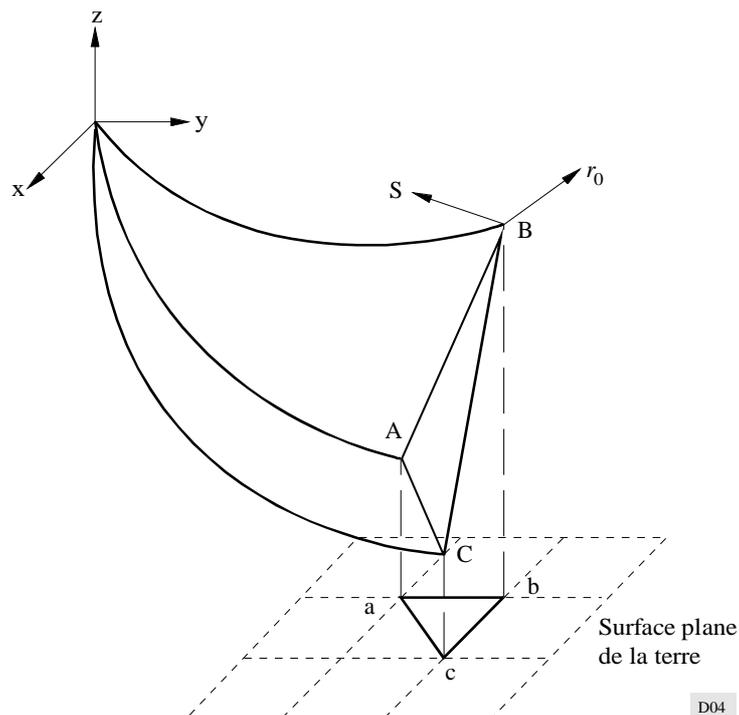
$$B_e = 0,5 [h(\sin \theta, \cos \theta) \cos(\varphi + 2\mu) + \Delta x \Delta y \sin(\varphi + 2\mu)]$$

(8)

$$h(u, v) = u \Delta z_{ba} \Delta y + v \Delta z_{bc} \Delta x$$

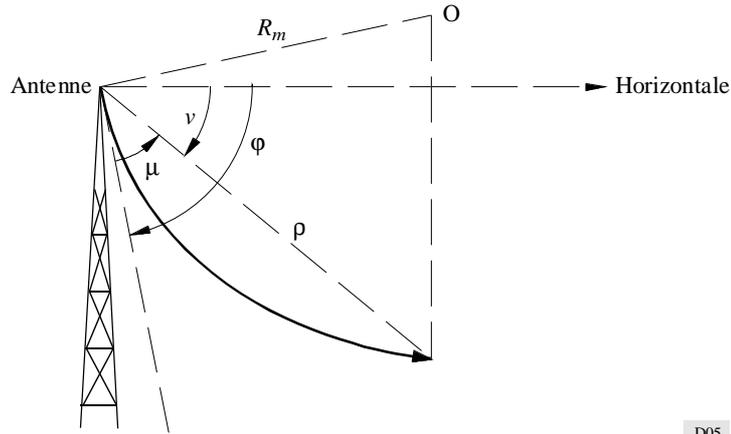
Dans cette dernière formule  $\Delta z_{ba}$  et  $\Delta z_{bc}$  sont les incréments de hauteur des points d'un triangle par rapport à la hauteur du sommet de l'angle droit (voir la Fig. 4);  $\Delta x$  et  $\Delta y$  sont les dimensions de la cellule du quadrillage,  $\varphi$  et  $\theta$  l'angle d'élévation et l'azimut du centre du triangle;  $\mu$  l'angle de la corde par rapport à la tangente du rayon diffusé (voir la Fig. 5). Il est à noter que  $A_{e,i}$  représente l'aire projetée sur l'unité de surface sphérique du terrain  $\Delta S_i$  qui est indépendant des conditions de propagation.

FIGURE 4  
Surface équivalente du diffuseur



D04

FIGURE 5  
Angle d'élévation



D05

Cette formule n'exige le calcul d'aucun angle, puisque toutes les fonctions trigonométriques peuvent être calculées explicitement dans la relation (8) de la façon suivante:

$$\sin \theta = \frac{x}{(x^2 + y^2)^{1/2}}, \quad \cos \theta = \frac{y}{(x^2 + y^2)^{1/2}}$$

$$\sin(\varphi + 2\mu) = \frac{z}{\rho} \left(1 - \frac{\rho^2}{4R_e^2}\right)^{1/2} + \frac{d}{2R_e} \quad (9)$$

$$\cos(\varphi + 2\mu) = \frac{d}{\rho} \left(1 - \frac{\rho^2}{4R_e^2}\right)^{1/2} - \frac{z}{2R_e}$$

avec  $\rho = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$ , distance entre l'antenne et le diffuseur,  $d = (x^2 + y^2)^{1/2}$  sa projection sur un plan horizontal,  $R_e = a \cdot k$ , avec  $a$  rayon de la Terre, et  $k$  facteur multiplicatif du rayon terrestre, lequel dépend du gradient de réfractivité de l'atmosphère.

En substituant (9) dans (8) on obtient:

$$B_e = 0,5 \left[ h(x, y) \left( \frac{1}{\rho} - \frac{z}{2dR_e} \right) + \Delta x \Delta y \left( \frac{z}{\rho} + \frac{d}{2R_e} \right) \right] \quad (10)$$

formule dans laquelle  $(x, y, z)$  sont les coordonnées du centre du triangle. Puisque  $z \ll R_e$ , il est possible de simplifier la relation ci-dessus:

$$B_e = \frac{0,5}{\rho} [h(x, y) + \Delta x \Delta y z] + \frac{d}{4R_e} \Delta x \Delta y \quad (11)$$

### 3.2 Techniques de bornage

Le partitionnement de l'univers  $\Omega$  en deux sous-ensembles mutuellement exclusifs  $S_0$  et  $Q_0$ , permet de définir une méthode récursive de calcul de  $P_r$ :

$$S_0 \cup Q_0 = \Omega, \quad S_0 \cap Q_0 = \emptyset \quad (12)$$

si l'on définit par ailleurs l'intégrale de la relation (1) comme la somme de deux intégrales:

$$P_r = C_t \int_{S_0} \frac{G_t G_r}{R_t^2 R_r^2} \gamma dA_e + C_t \int_{Q_0} \frac{G_t G_r}{R_t^2 R_r^2} \gamma dA_e \quad (13)$$

Le calcul de cette expression se fait par intégration numérique du premier terme, puis par bornage du second. Si la borne est nettement inférieure à la valeur calculée de la première intégrale, alors la valeur de l'intégrale calculée sur l'univers  $\Omega$  peut être remplacée par l'intégrale calculée sur  $S_0$ . La précision requise de l'estimation détermine la valeur maximale de la borne par rapport à celle de l'intégrale. Pour la plupart des applications, le fait que la borne ne dépasse pas 0,1 fois la valeur de l'intégrale permet de substituer le domaine d'intégration  $S_0$  à l'univers  $\Omega$ , ce qui conduit à estimer  $P_r$  avec moins de 0,41 dB d'erreur. Une erreur de cet ordre est acceptable, en particulier compte tenu des incertitudes affectant les coefficients de diffusion et les données cartographiques. En règle générale, les antennes sont fortement directives et le domaine  $S_0$  d'intégration exacte est nettement moins étendu que la totalité du domaine.

Si la borne déterminée sur  $Q_0$  n'est pas nettement inférieure à la valeur de l'intégrale calculée sur  $S_0$ , le domaine d'intégration  $S_0$  doit alors être remplacé par un domaine d'intégration plus étendu  $S_0 \cup S_1$  ( $S_1 \subset Q_0$ ).  $Q_1$  est défini comme le complémentaire de  $S_1$  par rapport à  $Q_0$ , de telle sorte que  $S_1 \cup Q_1 = Q_0$  et  $S_1 \cap Q_1 = \emptyset$ . Il faut ensuite calculer la borne sur  $Q_1$ . Puisque la valeur de l'intégrale calculée sur le domaine  $Q_1$  ne peut dépasser celle de l'intégrale calculée sur  $Q_0$ , la borne sur  $Q_1$  est en règle générale inférieure à la borne sur  $Q_0$ . De plus l'intégrale calculée sur le domaine  $S_0 \cup S_1$  est nécessairement supérieure à l'intégrale sur  $S_0$ . Par conséquent, si le processus est réitéré  $n$  fois, la borne tend vers une valeur inférieure à celle de l'intégrale sur  $\cup_i S_i$ , ce qui permet de remplacer l'intégrale sur l'univers  $\Omega$  par l'intégrale sur le sous-ensemble  $\cup_i S_i$ . Dans la pratique, il est souhaitable de prendre pour  $n$  une valeur peu élevée, disons 1 ou 2. Il suffit à cet effet de choisir convenablement  $S_0$  et d'élaborer un algorithme permettant de resserrer autant que possible le bornage sur  $Q_0$  (et sur les autres  $Q_i$ ).

Il est à signaler que l'on peut ajouter les  $S_i$  au domaine d'intégration réel et mettre à profit les résultats précédemment obtenus, de manière que l'intégrale sur un domaine quelconque  $S_i$  soit calculée une fois pour toutes. Du fait que les bornes sont plus faciles à calculer, cette opération peut être réitérée autant de fois qu'il le faut, suivant la précision requise.

L'évaluation des bornes supérieures  $Q_0, Q_1, \dots$ , repose sur l'inégalité  $\gamma d A_e \leq \gamma R_t^2 d\omega_t$ , dans laquelle  $d\omega_t$  représente l'angle solide formé par l'élément  $dS$ , avec le sommet de l'angle au niveau de l'antenne (voir la Note). En coordonnées sphériques, avec l'origine au niveau de l'émetteur,

$$P_{r,e} = C_t \int_{Q_0} \frac{G_t G_r}{R_r^2 R_t^2} \gamma d A_e \leq C_t \max_{Q_0} \left[ \frac{\gamma G_t G_r}{R_r^2} \right] D_0 \quad (14)$$

$D_0$  étant la superficie de la projection du domaine d'intégration  $Q_0$  sur l'unité de surface sphérique dont le centre coïncide avec l'émetteur, tandis que  $\varphi_t$  et  $\theta_t$  désignent respectivement le site et l'azimut de l'élément de diffuseur.

Puisque:

$$\max_{Q_0} \left[ \frac{\gamma G_t G_r}{R_r^2} \right] \leq \frac{\gamma_{\max} G_{t,\max} G_{r,\max}}{R_{r,\min}^2} \quad (15)$$

les maxima et les minima étant définis dans le domaine  $Q_0$ :

$$P_{r,e} \leq C_t \frac{G_{t,\max} G_{r,\max}}{R_{r,\min}^2} \gamma_{\max} D_0 \quad (16)$$

Le choix d'un système de coordonnées sphériques dont le centre coïncide avec le récepteur donne des résultats analogues:

$$P_{r,e} \leq C_t \frac{G_{t,\max} G_{r,\max}}{R_{t,\min}^2} \gamma_{\max} D_0 \quad (17)$$

La plus rapprochée de ces deux bornes est de la forme:

$$P_{r,e} \leq C_t \frac{G_{t,\max} G_{r,\max}}{R_m^2} \gamma_{\max} D_0 \quad (18)$$

avec:

$$R_m = \max \{R_{r,\min}, R_{t,\min}\} \quad (19)$$

Le choix de domaines  $S_0$  différents ne conduit pas aux mêmes valeurs des bornes. Dans le cas le plus important,  $S_0$  représente une zone de terrain située à l'intersection des angles  $|\theta_{r,0} - \theta_r| < \varepsilon_1$ ,  $|\theta_{t,0} - \theta_t| < \varepsilon_2$ , avec  $\theta_{r,0}$  et  $\theta_{t,0}$  valeurs des angles d'azimut des antennes (voir la Fig. 2). Si  $\varepsilon_1$  et  $\varepsilon_2$  sont choisis de telle sorte que les gains d'antenne à l'intérieur des angles solides en question soient supérieurs aux maxima locaux au niveau des lobes latéraux correspondants, alors l'expression de la borne peut être modifiée comme suit:

$$P_{r,e} \leq C_t \frac{G_r(\theta_{r,0} + \varepsilon_1, \varepsilon_1) G_t(\theta_{t,0} + \varepsilon_2, \varepsilon_2)}{R_m^2} \gamma_{max} D_0 \quad (20)$$

Dans ce cas particulier, il est possible de définir  $R_{t,min}$  et  $R_{r,min}$  à partir du triangle RXT tel qu'indiqué à la Fig. 2:

$$R_{t,min} = \frac{L \sin(\eta_2 - \varepsilon_2)}{\sin(\eta_1 + \eta_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_2)} \quad (21)$$

$$R_{r,min} = \frac{L \sin(\eta_1 - \varepsilon_1)}{\sin(\eta_1 + \eta_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_2)}$$

La méthode de calcul de la surface  $D_0$  est indiquée à l'Annexe 2. Toutefois, pour éviter des calculs compliqués, la valeur de cette surface peut être délimitée par la superficie totale de la sphère unité égale à  $4\pi$ .

Les calculs précédents de valeur des bornes étaient fondés sur la directivité des antennes. D'autres bornes peuvent être calculées à partir de la relation (2). Par exemple, il est possible d'éliminer les zones éloignées du calcul de l'intégrale. La borne correspondante prend alors la forme ci-dessous:

$$P_{r,x} \leq C_t \frac{G_r(\theta_{r,0}, 0) G_t(\theta_{t,0}, 0)}{R^2} \gamma_{max} \bar{D}_0 \quad (22)$$

avec  $\bar{D}_0$  surface de la projection du domaine d'intégration  $S_0$  sur la sphère unité,  $R$  étant choisi de manière que  $P_{r,x} + P_{r,e}$  soit inférieur à la précision requise.

*Note du Directeur du BR* – A titre d'information, la déduction de cette évaluation est donnée dans:

SMITH, W.E., SULLIVAN, P.L., GIGER, A.J. et ALLEY., G.D. [juin, 1987] Recent advances in microwave interference prediction. IEEE International Conference on Communications (ICC '87), paper 23.2.

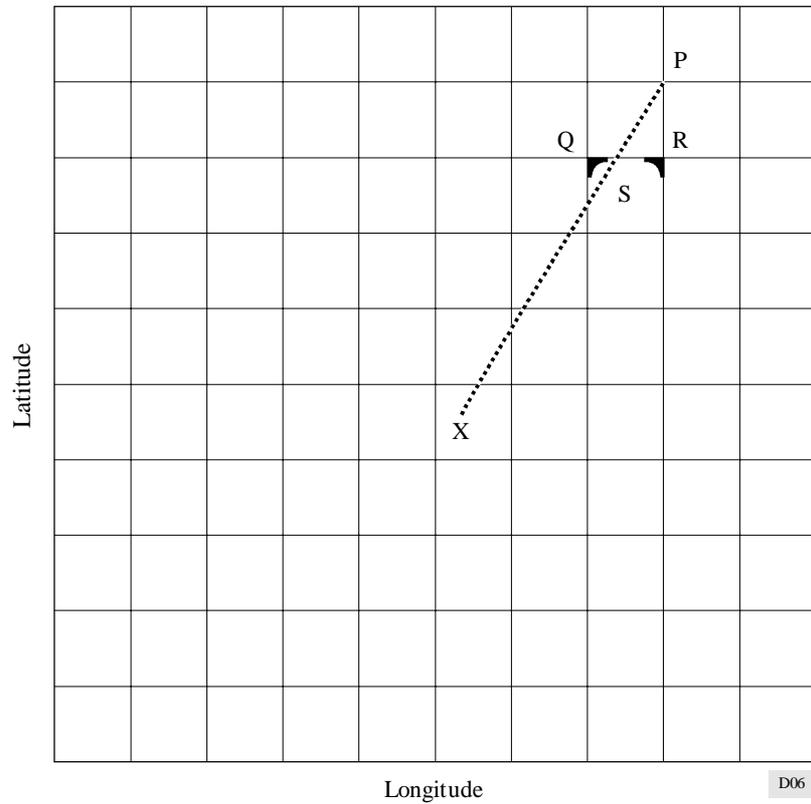
## 4. Occultation

### 4.1 Macro-occultation

Puisque l'occultation d'une zone élémentaire est fonction de l'occultation de chacun de ses points, il est indispensable de définir l'occultation des points constitutifs. Il serait pratique à cet effet de choisir un système de coordonnées sphériques dont l'origine coïncide avec l'antenne. Dans des calculs de ce type en coordonnées sphériques, l'algorithme utilisé doit simplement suivre la valeur du plus grand angle d'émergence dans le plan radial, et mettre à jour le cas échéant la valeur de l'angle d'émergence maximum.

Les notions d'occultation restent identiques en cas d'utilisation d'un système de coordonnées rectangulaires, mais la détermination de la visibilité d'un point quelconque du quadrillage n'est pas facile, en l'absence de garantie quant à la possibilité de trouver un ou plusieurs points du quadrillage dont l'azimut est égal à celui du point de mesure. Il faut par ailleurs estimer de façon approchée l'angle d'émergence maximum dans le plan radial, pour pouvoir lui comparer l'angle d'émergence du point de mesure, afin de déterminer sa visibilité. Pour un point de mesure P donné, il faut d'abord déterminer les deux points Q et R du quadrillage plus proches que le point de mesure, suivre le plan radial tracé depuis l'antenne jusqu'au point de mesure, puis réduire au minimum la différence d'azimut, ainsi que les angles d'émergence. La Fig. 6 représente la projection de ces points sur le plan horizontal.

FIGURE 6  
Occultation du point de mesure P par  
la méthode des angles d'émergence visible aux points Q et R



L'angle d'émergence au point de mesure P doit être comparé à l'angle d'émergence visible susceptible d'être associé au point d'intersection S du plan radial avec le segment de droite reliant les deux points du quadrillage. Ce plan radial est représenté à la Fig. 7; la comparaison de l'angle d'émergence  $\varphi_S$  à  $\varphi_P$  permet de déterminer si P est visible, si et seulement si  $\varphi_P \geq \varphi_S$ , en supposant S visible. Sinon P est occulté, c'est-à-dire invisible.

L'angle d'émergence  $\varphi$  d'un point quelconque peut être calculé par la formule suivante, d'après la Fig. 5:

$$\varphi = \arcsin \left[ \frac{z}{\rho} \left( 1 - \frac{\rho^2}{4R_e^2} \right)^{1/2} - \frac{d}{2R_e} \right] \quad (23)$$

où:

$$R_e = k \cdot a$$

$k$ : facteur multiplicatif du rayon terrestre qui dépend du gradient du coindice de réfraction

$a$ : rayon de la Terre

$d$ : distance horizontale mesurée entre l'antenne et le point de mesure

$z$ : hauteur du point de mesure au-dessus de l'antenne

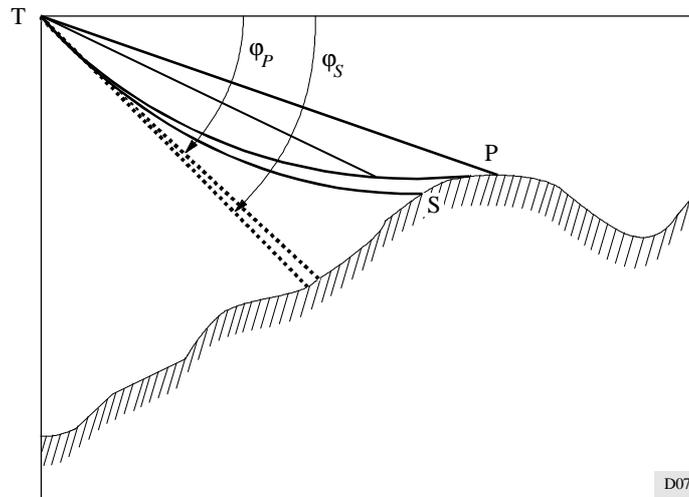
$$\rho = (x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}$$

Puisque  $\arcsin x$  est une fonction monotone croissante, il suffit de comparer les arguments de la fonction arc sin pour déterminer la visibilité de P, compte tenu du fait que S est visible. Comme  $\rho \ll R_e$ , le critère permettant de déterminer si P est occulté par S peut s'écrire comme suit:

$$\frac{z_p}{\rho_p} - \frac{d_p}{2R_e} < \frac{z_s}{\rho_s} - \frac{d_s}{2R_e} \quad (24)$$

Dans le cas d'un système de coordonnées rectangulaires l'angle d'émergence  $\varphi_S$  au point S peut être déterminé par interpolation linéaire:

FIGURE 7  
Occultation du point de mesure P



D07

$$\varphi_S = \frac{d_{QS}}{d_{QR}} \varphi_Q + \frac{d_{RS}}{d_{QR}} \varphi_R \quad (25)$$

formule dans laquelle:

$d_{QS}$ : distance entre Q et S

$d_{QR}$ : distance entre Q et R

$d_{RS}$ : distance entre R et S.

Les calculs d'occultation commencent par les points du quadrillage les plus proches de l'émetteur, en supposant qu'ils sont visibles. Les points utilisés ultérieurement s'éloignent progressivement en délimitant des rectangles concentriques, de façon à couvrir la totalité du quadrillage et à pouvoir déterminer l'occultation de tous les points.

#### 4.2 Micro-occultation

La micro-occultation d'une zone élémentaire est déterminée par son orientation. Considérons la zone triangulaire élémentaire de la Fig. 4. Il y a micro-occultation du triangle si et seulement si la normale extérieure à sa surface et le vecteur unité tangent  $r_0$  du rayon correspondant forment un angle aigu. Cette condition peut s'écrire comme suit:

$$N \cdot r_0 \geq 0 \quad (26)$$

Soit  $z_a$ ,  $z_b$  et  $z_c$  les altitudes des trois points voisins du quadrillage (voir la Fig. 4) et supposons qu'au moins l'un d'entre eux ne soit pas occulté. Les sommets du triangle ABC sensiblement équivalents à la surface élémentaire considérée peuvent être définis par leurs coordonnées cartésiennes:  $A(x_b, y_b + \Delta y, z_a)$ ,  $B(x_b, y_b, z_b)$ ,  $C(x_b + \Delta x, y_b, z_c)$ . Supposons  $\angle abc = 90^\circ$ . L'inégalité (26) peut alors s'écrire (voir la Note):

$$\delta \left[ h(\sin \theta, \cos \theta) \cos(\varphi + 2\mu) + \Delta x \Delta y \sin(\varphi + 2\mu) \right] \geq 0$$

$$h(u, v) = u \Delta z_{ba} \Delta y + v \Delta z_{bc} \Delta x \quad (27)$$

$$\delta = \text{sign}(\Delta x \Delta y)$$

dans laquelle  $\varphi$  est l'angle d'émergence,  $\mu$  la différence entre l'angle d'émergence et l'angle d'élévation et  $\theta$  l'azimut du diffuseur. La moitié de la valeur absolue du membre de gauche de cette inégalité est égale à la surface équivalente du diffuseur donnée par la formule (8). L'évaluation du membre de gauche de l'inégalité (27) intervient donc dans le calcul du brouillage produit par un élément de diffuseur et peut servir en outre à déterminer sa micro-occultation.

Une méthode approchée simplifiée de détermination de la micro-occultation et d'évaluation du terme  $B_e$ , c'est-à-dire de la surface équivalente d'un triangle élémentaire, est indiquée à l'Annexe 3. Cette méthode permet de réduire le temps de calcul nécessaire grâce à l'utilisation dans les relations (11) et (27) d'une valeur de première approximation de  $\varphi$ . Elle est applicable dès lors que les angles d'émergence dans la région voisine de l'intersection des faisceaux principaux des antennes brouilleuse et brouillée sont inférieurs à  $5^\circ$  environ, auquel cas les erreurs introduites par cette simplification ne dépassent pas 10%.

*Note du Directeur du BR* – A titre d'information, la déduction de cette évaluation est donnée dans:

KAHN, A.L., PRABHU, V.K. et TURIN, W. [1991] Shadowing algorithms in estimating ground scatter interference. Conf. Record, IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM '91).

## ANNEXE 2

### Calcul de la surface d'un quadrilatère sur la sphère unité

La surface du quadrilatère,  $D_0$  est donnée par la formule:

$$D_0 = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 - 2\pi \quad (28)$$

dans laquelle  $A_1, A_2, A_3$  et  $A_4$  désignent les angles des sommets du quadrilatère sur la sphère unité.

Les angles  $A_i$  sont formés par les plans dans lesquels se trouvent le centre de la sphère et les grands cercles correspondants. La valeur de  $A_i$  peut être tirée de la relation:

$$\cos A_i = \frac{N_j \cdot N_k}{N_j \cdot N_k} \quad (29)$$

dans laquelle  $N_j$  et  $N_k$  sont les vecteurs normaux aux plans, et  $N_j$  et  $N_k$  leurs longueurs respectives. Ces vecteurs sont définis comme étant les produits vectoriels des vecteurs radiaux des points correspondants de la surface de la sphère. Par exemple, si  $r_i$  désigne le vecteur radial du sommet  $A_i$ :

$$\cos A_2 = \frac{(r_2 \times r_1) \cdot (r_3 \times r_2)}{|r_2 \times r_1| \cdot |r_3 \times r_2|} \quad (30)$$

Considérons le système de coordonnées cartésiennes et sphériques dont l'origine est au centre de la sphère afin d'établir les relations formelles correspondantes; on peut alors définir comme suit le vecteur radial correspondant au point  $A_i$  sur la sphère unité:

$$r_i = \{ \cos \varphi_i \sin \theta_i, \cos \varphi_i \cos \theta_i, \sin \varphi_i \} \quad (31)$$

Le produit vectoriel de ces vecteurs est égal à:

$$r_{ij} = r_i \times r_j = \{ x_{ij}, y_{ij}, z_{ij} \} \quad (32)$$

avec:

$$x_{ij} = \cos \varphi_i \cos \theta_i \sin \varphi_j - \cos \varphi_j \cos \theta_j \sin \varphi_i$$

$$y_{ij} = \cos \varphi_j \sin \theta_j \sin \varphi_i - \cos \varphi_i \cos \theta_i \sin \varphi_j \quad (33)$$

$$z_{ij} = \cos \varphi_i \sin \theta_i \cos \varphi_j \cos \theta_j - \cos \varphi_j \sin \theta_j \cos \varphi_i \cos \theta_i$$

Quant au produit scalaire des produits vectoriels dans la formule (30), il est donné par:

$$r_{ij} \cdot r_{kl} = x_{ij} x_{kl} + y_{ij} y_{kl} + z_{ij} z_{kl} \quad (34)$$

et la longueur du vecteur par:

$$r_{ij} = \left( x_{ij}^2 + y_{ij}^2 + z_{ij}^2 \right)^{1/2} \quad (35)$$

### ANNEXE 3

#### Autre méthode de calcul de la surface équivalente et de la micro-occultation

Dans le cas des faibles valeurs des angles d'émergence et des variations d'azimut à l'intérieur d'une zone triangulaire semblable à celle de la Fig. 4, le classement des sommets du triangle par azimuts croissants autorise une détermination approchée de la micro-occultation:  $P_1(\rho_1, \varphi_1, \theta_1)$ ,  $P_2(\rho_2, \varphi_2, \theta_2)$ ,  $P_3(\rho_3, \varphi_3, \theta_3)$

$$\theta_1 \leq \theta_2 \leq \theta_3 \quad (36)$$

On détermine ensuite par interpolation linéaire les coordonnées du point  $P_x$  situé à l'azimut  $\theta_2$ , sur la droite reliant  $P_1$  et  $P_3$ . Si le point  $P_2$  est plus éloigné de l'antenne que  $P_x$  et si son altitude est inférieure à celle de  $P_x$ , alors la surface est micro-occultée. Il en est également ainsi lorsque  $P_2$  est plus près de l'antenne que  $P_x$  et que son altitude est supérieure à celle de  $P_x$ .

Si l'on définit  $\Delta\varphi$  comme étant égal à l'altitude de  $P_2$  moins celle de  $P_x$ , et  $\Delta\rho$  comme la différence entre les distances respectives de  $P_2$  et de  $P_x$  par rapport à l'antenne, la condition à vérifier pour qu'une cellule soit micro-occultée s'écrit:

$$\Delta\rho \cdot \Delta\varphi \leq 0 \quad (37)$$

avec:

$$\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1 \frac{\theta_3 - \theta_2}{\theta_3 - \theta_1} - \rho_3 \frac{\theta_2 - \theta_1}{\theta_3 - \theta_1}$$

(38)

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 \frac{\theta_3 - \theta_2}{\theta_3 - \theta_1} - \varphi_3 \frac{\theta_2 - \theta_1}{\theta_3 - \theta_1}$$

La valeur approchée de la surface équivalente du triangle peut être obtenue par:

$$B_e = \frac{\rho^2 \cos \varphi}{2} |\Delta A| \quad (39)$$

formule dans laquelle  $\rho$  représente la distance entre l'antenne et le triangle élémentaire, tandis que:

$$\Delta A = (\theta_3 - \theta_1) \Delta \varphi \quad (40)$$

La valeur  $\Delta \varphi$  peut donc servir non seulement à déterminer la micro-occultation, mais aussi à calculer la superficie de la projection. Il convient de signaler que  $\theta$  est mesuré modulo  $2\pi$  et que les triangles élémentaires sont peu étendus en azimut; dans les formules (38) et (40) il y a donc lieu de réduire de  $2\pi$  toute différence  $\theta_i - \theta_j$  supérieure à  $\pi$ .

---