

RAPPORT 1008-1

RÉFLEXION SUR LA SURFACE DE LA TERRE

(Question 1/5)

(1986-1990)

1. Introduction

Le présent Rapport décrit l'influence de la réflexion des ondes sur la surface de la Terre sur le fonctionnement des systèmes de télécommunications. Cette influence est importante lorsque le signal réfléchi est suffisamment intense pour interférer sensiblement avec le signal direct, soit qu'il le renforce, soit qu'il l'affaiblit. L'intensité du signal réfléchi aux bornes de l'antenne du récepteur dépend de la directivité et de la hauteur au-dessus du sol des terminaux, de la nature du sol et de la longueur du trajet radioélectrique.

C'est dans les systèmes qui utilisent des antennes peu directives, comme celles des services mobiles, que l'influence des signaux réfléchis est généralement importante. Cette influence est devenue un impératif de conception dans le service mobile aéronautique. On retrouve les mêmes conditions dans les services mobiles maritimes et terrestres par satellite, car un trajet en visibilité directe existe dans toute la zone de service.

La suite de ce Rapport comprend trois parties. La première traite de la réflexion spéculaire sur une surface terrestre plane. La partie suivante traite de la réflexion sur une surface sphérique lisse et peut servir de base pour des applications pratiques. La dernière partie contient une description quantitative de la réflexion diffuse (diffusion) sur des surfaces rugueuses et traite de la combinaison des signaux directs, des signaux ayant subi une réflexion spéculaire et des signaux ayant subi une diffusion, ainsi que du comportement statistique de ces signaux.

2. Réflexion spéculaire sur une surface terrestre plane

Le coefficient de réflexion R_0 d'une surface plane est donné par la formule:

$$R_0 = \frac{\sin \varphi - \sqrt{C}}{\sin \varphi + \sqrt{C}} \quad (1)$$

dans laquelle φ est l'angle d'inclinaison et

$$C = \eta - \cos^2 \varphi \quad \text{pour la polarisation horizontale,}$$

$$C = (\eta - \cos^2 \varphi) / \eta^2 \quad \text{pour la polarisation verticale,}$$

avec

$$\eta = \varepsilon_r(f) - j60\lambda\sigma(f)$$

où:

$\varepsilon_r(f)$: permittivité relative du sol à la fréquence f

$\sigma(f)$: conductivité du sol à la fréquence f (S/m)

λ : longueur d'onde en espace libre (m)

Le coefficient R_0 est représenté à la Fig. 1 en fonction de l'angle d'inclinaison pour diverses fréquences et deux séries de valeurs pour $\varepsilon_r(f)$ et $\sigma(f)$ correspondant à l'eau de mer et au terrain sec respectivement [Hall, 1979]. L'angle pour lequel le module du coefficient de réflexion pour la polarisation verticale a une valeur minimale est appelé angle de Brewster. Cet angle, φ_p , est approximativement égal à $\sin^{-1}(1/\sqrt{|\eta|})$.

On doit apporter une attention particulière à l'angle de Brewster dans les régions côtières, ce qui peut être important pour réduire les problèmes causés par les réflexions sur la mer [Furnes, 1984; Stokke, 1984].

2.1 Effets de la polarisation

Les termes de polarisation horizontale et de polarisation verticale ont été, à l'origine, définis par rapport à la réflexion sur une surface terrestre plane parce qu'il est pratique, analytiquement, de traiter séparément les composantes du champ électrique d'une onde radioélectrique suivant qu'elles sont parallèles ou perpendiculaires à la surface réfléchissante. On peut généraliser cette notion pour inclure à la fois les trajets terrestres et Terre-espace en définissant un plan de polarisation de référence. Ce plan contient le centre de la Terre et les deux terminaux du trajet. La composante du champ électrique de l'onde radioélectrique normale à ce plan est la composante polarisée horizontalement. La composante du champ électrique de l'onde radioélectrique parallèle à ce plan est la composante polarisée verticalement.

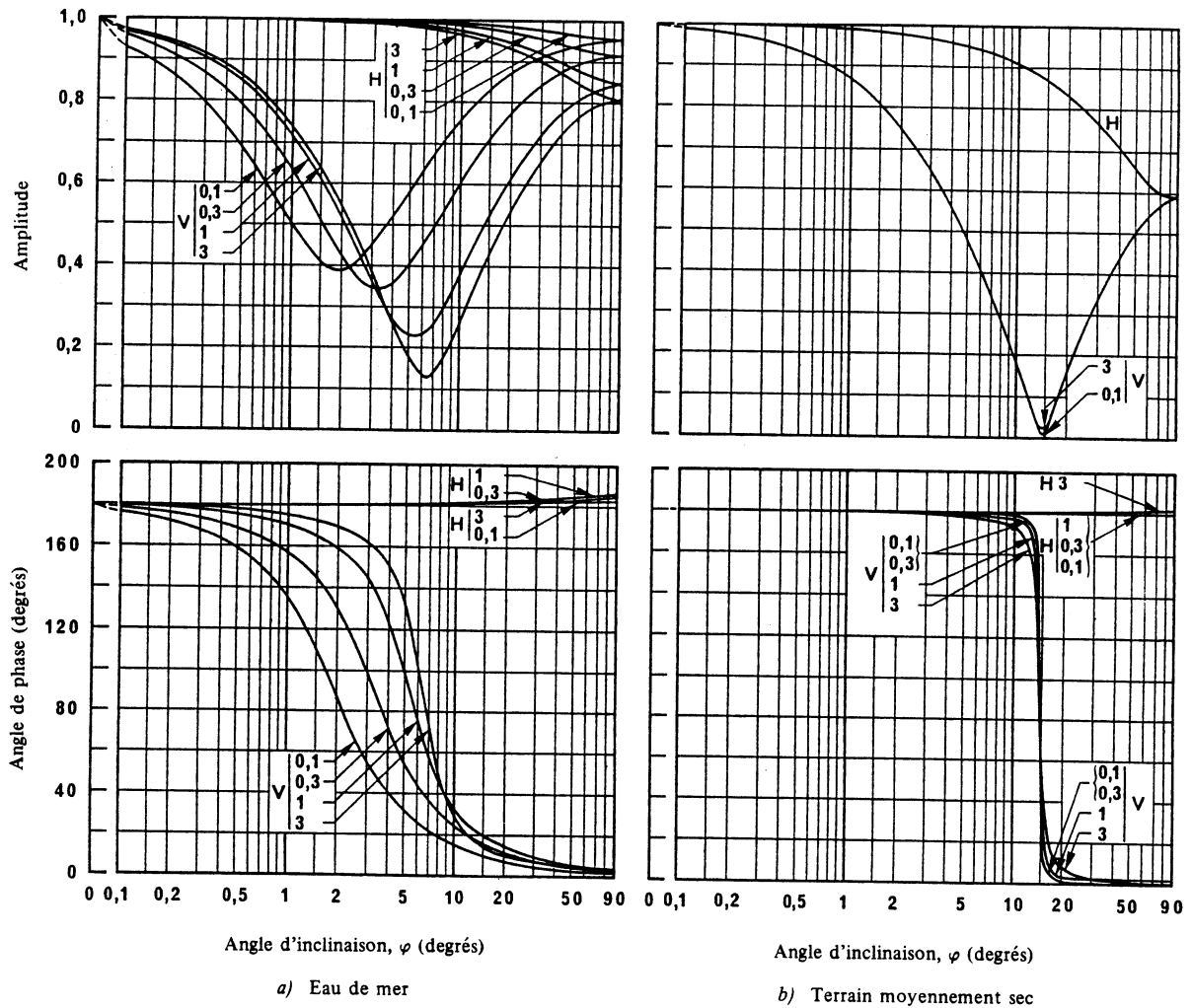


FIGURE 1 – Amplitude et phase du coefficient de réflexion d'une surface terrestre plane en fonction de l'angle d'inclinaison, φ , en polarisation verticale (V) et horizontale (H)

Les fréquences sont indiquées en GHz.

Note. – Les caractéristiques de l'eau de mer et du terrain moyennement sec sont données dans la Recommandation 527.

Le coefficient de réflexion spéculaire pour la polarisation verticale est inférieur ou égal au coefficient de réflexion spéculaire pour la polarisation horizontale. De ce fait, la polarisation de l'onde réfléchie sera différente de la polarisation de l'onde incidente si la polarisation incidente n'est pas purement horizontale ou purement verticale. Par exemple, une onde incidente polarisée circulairement devient polarisée elliptiquement après réflexion. Le sens de la rotation lui aussi s'inverse si l'angle d'inclinaison est supérieur à l'angle de Brewster.

On effectue habituellement le calcul de l'amplitude et de la polarisation de l'onde réfléchie en décomposant l'onde incidente en composantes horizontale et verticale, puis en calculant l'amplitude et la phase de chacune des composantes de l'onde réfléchie en utilisant l'équation (1) [Kraus et Carver, 1984].

3. Réflexion spéculaire sur une Terre sphérique lisse

La réflexion d'un signal sur une Terre sphérique lisse (voir la Fig. 2) est qualifiée de spéculaire car l'angle d'inclinaison, φ , est égal à l'angle de réflexion. L'amplitude du signal réfléchi est égale à celle du signal incident multipliée par le module du coefficient de réflexion R . La phase du signal réfléchi est égale à la somme de la variation de phase due à la réflexion et de celle due à la différence de longueur entre les trajets du signal direct et du signal réfléchi.

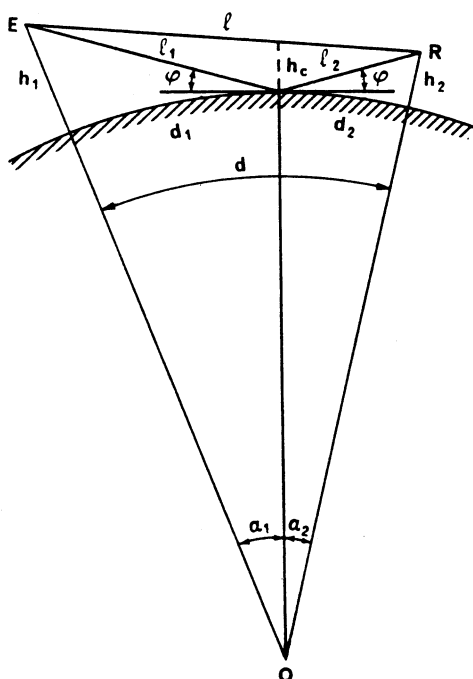


FIGURE 2 – Géométrie de la réflexion sur une Terre sphérique

3.1 Réflexion aux faibles angles d'inclinaison

Dans la plupart des systèmes de communication de Terre, la réflexion se fait avec un angle d'inclinaison très faible. Dans ce cas, le coefficient de réflexion R est sensiblement égal à -1 . Il s'ensuit qu'à la réception, le champ direct et le champ réfléchi ont la même amplitude et sont presque en opposition de phase. La différence de phase réelle dépend de la différence entre les longueurs des trajets.

Il est commode d'exprimer le dégagement du trajet en déterminant quel est l'ellipsoïde de Fresnel (voir le Rapport 715) qui est tangent au sol, mais en considérant que le nombre n qui caractérise cet ellipsoïde n'est pas obligatoirement un nombre entier. On peut alors montrer que le niveau reçu est inférieur au niveau d'espace libre si n est inférieur à 1,3, c'est-à-dire si le rayon équatorial de l'ellipsoïde tangent au sol est inférieur à la fraction $1/\sqrt{3}$ du rayon équatorial du premier ellipsoïde de Fresnel.

Une autre valeur de dégagement est également utile à connaître, c'est la valeur au-dessous de laquelle l'optique géométrique ne peut plus être utilisée, car les phénomènes de diffraction deviennent prépondérants. Cette valeur s'exprime au moyen de l'angle d'inclinaison du rayon réfléchi. La valeur limite de cet angle est donnée par la relation approchée:

$$\varphi(\text{mrad}) = \left\{ \frac{2100}{f(\text{MHz})} \right\}^{1.3} \quad (2)$$

ce qui donne, par exemple, un angle limite de 5,94 mrad à 10 MHz, 2,76 mrad à 100 MHz et 1,28 mrad à 1 GHz [Boithias, 1984].

3.2 Géométrie de la réflexion

Pour analyser les réflexions sur une surface, il faut déterminer le point géométrique de réflexion spéculaire, qui est situé à une certaine distance d_1 de l'un des terminaux. Ce n'est pas là un problème facile car on ne peut trouver de solution exacte que dans le cas d'une Terre plane. On peut trouver des solutions approchées pour de faibles distances angulaires lorsque les terminaux sont proches de la surface de la Terre et quand ils sont séparés par de très grandes distances, comme c'est le cas pour un terminal de Terre et un satellite géostationnaire [Boithias, 1984; Kerr, 1965].

Dans le premier cas, il est utile de définir les deux grandeurs intermédiaires m et c ci-après:

$$m = \frac{d^2}{4 a_e (h_1 + h_2)} \quad (3)$$

$$c = (h_1 - h_2)/(h_1 + h_2) \quad h_1 > h_2 \quad (4)$$

a_e étant le rayon terrestre équivalent et les autres grandeurs étant celles indiquées à la Fig. 2. Dans ces conditions, on obtient une troisième grandeur, b :

$$b = 2 \sqrt{\frac{m+1}{3m}} \cdot \cos \left[\frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \arccos \left(\frac{3c}{2} \sqrt{\frac{3m}{(m+1)^3}} \right) \right] \quad (5)$$

et l'on obtient les grandeurs recherchées, à savoir la distance d_1 , la différence des longueurs des trajets Δ et l'angle d'inclinaison φ , (rad), au moyen des formules:

$$d_1 = \frac{d}{2} (1 + b) \quad (6)$$

$$\Delta = \frac{2d_1 d_2}{d} \varphi^2 \quad (7)$$

$$\varphi = \frac{h_1 + h_2}{d} [1 - m(1 + b^2)] \quad (8)$$

Pour les trajets Terre-espace, l et l_1 sont pratiquement parallèles en raison des grandes distances considérées. Dans ce cas:

$$d_1 \approx h \cotg E \quad (9)$$

$$\Delta \approx 2h \sin E \quad (10)$$

$$\varphi \approx E + \frac{h}{a_e + h} \cotg E \quad (11)$$

E étant l'angle de site du satellite et h la hauteur de la station terrienne au-dessus de la surface terrestre.

Une méthode expérimentale permettant de localiser le point de réflexion au moyen de mesures des variations du champ reçu en fonction de la hauteur a été mise au point [Furnes, 1984] et utilisée avec succès pour des applications concernant la radiodiffusion.

3.3 Facteur de divergence

Lorsqu'il y a réflexion spéculaire des rayons sur une surface sphérique, le coefficient de réflexion subit une réduction apparente, qui est en réalité un effet géométrique tenant à la divergence des rayons. On tient compte de cet effet en exprimant le coefficient de réflexion d'une Terre sphérique lisse par la formule:

$$R = D R_0 \quad (12)$$

où R_0 est le coefficient de réflexion de la formule (1) pour le cas de la surface plane et D un facteur de divergence.

Le facteur de divergence pour des trajets de Terre est donné par la formule:

$$D = \left[1 + \frac{2}{a_e \sin \varphi} \frac{l_1 l_2}{l_1 + l_2} \right]^{-1/2} \quad (13)$$

et, pour les trajets Terre-espace, cette formule peut s'écrire:

$$D \approx \left[1 + \frac{2h \operatorname{tg} E}{a_e \sin \varphi} \right]^{-1/2} \quad (14)$$

La formule (14) donne $D \approx 1$ pour des angles de site supérieurs à 5° environ et des hauteurs du terminal inférieures à 2 km. La notion de facteur de divergence ne s'applique plus lorsque la valeur de l'angle d'inclinaison φ est inférieure à la valeur limite donnée par la formule (2).

3.4 Réflexion partielle sur la surface de la Terre

Dans le cas d'une Terre sphérique lisse, on peut assimiler le mécanisme de réflexion à la réflexion d'un rayon incident unique par un point géométrique unique. Toutefois, la surface de toute la zone contribue à la réflexion du signal et les régions qui y contribuent le plus sont les zones de Fresnel proches du point de réflexion géométrique.

Dans les considérations qui précèdent, relatives à la réflexion sur la surface de la Terre, on a admis que la Terre est une sphère uniforme et lisse. Dans la pratique, on peut rencontrer trois cas, ou des combinaisons de ces trois cas, non conformes au modèle théorique. Le premier cas est celui d'une surface rugueuse, c'est-à-dire dont les irrégularités ne sont pas trop grandes par rapport à une longueur d'onde. La réflexion sur une surface rugueuse est décrite de façon détaillée dans le § 4.

Le deuxième cas est celui d'un coefficient de réflexion non uniforme, c'est-à-dire dont la valeur varie avec la position sur la surface. C'est le cas de la surface réfléchissante que constitue un lac entouré par un sol de faible réflectivité.

Le troisième cas est celui d'une surface partiellement réfléchissante, c'est-à-dire lorsque des bâtiments, arbres, collines ou autres, obstruent le trajet en visibilité directe entre l'un des terminaux et une région quelconque de la surface réfléchissante.

La notion de coefficient de réflexion reste applicable dans ces cas non conformes au modèle théorique, à condition de modifier le coefficient de réflexion établi pour une Terre sphérique lisse afin de tenir compte des effets de ces surfaces non idéales.

Dans les deuxième et troisième cas, on peut avoir une estimation du champ réfléchi en utilisant la méthode de l'optique physique. Cette méthode utilise, en général, la théorie des images, le principe de Babinet et l'intégrale de Fresnel [Boithias, 1984]. Ces calculs permettent d'obtenir un coefficient de réflexion partiel F qui est le rapport de l'amplitude du champ réfléchi par la surface non uniforme à celle réfléchie par une surface uniforme.

D'un point de vue purement théorique, F peut prendre toute valeur comprise entre 0 et 2. La valeur de F est égale à 2 quand seule la première zone de Fresnel située autour du point de réflexion est illuminée par l'onde incidente. En pratique, dans la majorité des cas, on constate que la valeur de F est comprise entre 0,1 et 1,2.

3.5 Coefficient de réflexion équivalent d'une Terre sphérique

Le coefficient de réflexion équivalent d'une Terre sphérique, compte tenu des effets de divergence et de réflexion partielle, est donné par l'expression:

$$R = FDR_0$$

4. Réflexion sur une surface rugueuse

Il arrive souvent dans la pratique que la surface de la Terre ne soit pas lisse. La réflexion des ondes radioélectriques sur des surfaces rugueuse a fait l'objet d'études approfondies [Beckmann et Spizzichino, 1963], mais la question est si complexe que l'on n'est pas arrivé à élaborer des formules qui dérivent le processus de réflexion dans sa totalité.

Une formule utile est la suivante, qui définit quantitativement le critère de rugosité de Rayleigh:

$$g = 4\pi(S_h/\lambda) \sin \varphi \quad (15)$$

où:

S_h : écart type de la hauteur de la surface autour de sa moyenne locale à l'intérieur de la première zone de Fresnel

λ : longueur d'onde en espace libre

φ : angle d'inclinaison mesuré par rapport à une tangente à la surface.

De façon générale, on peut considérer qu'une surface est lisse lorsque $g < 0,3$. Quand la surface est rugueuse, le signal réfléchi a deux composantes: l'une, spéculaire, qui est cohérente avec le signal incident, l'autre, diffuse, qui fluctue en amplitude et en phase selon une distribution de Rayleigh.

4.1 Coefficient de réflexion spéculaire sur une surface rugueuse

La composante spéculaire provient d'une réflexion cohérente dans le plan d'incidence, à partir des zones de Fresnel situées autour du point de réflexion géométrique. On peut la décrire au moyen d'un coefficient de réflexion $R_s = \rho_s R$, ρ_s étant un facteur de réduction qui dépend du modèle. Pour une surface peu rugueuse, avec une distribution aléatoire des hauteurs:

$$\rho_s = \exp(-1/2 g^2) \quad (16)$$

Pour une surface très rugueuse, la valeur de ρ_s fournie par l'équation (16) tend à être sous-estimée. Il existe des modèles théoriques [DeSanto, 1981] faisant intervenir des réflexions multiples et qui concordent bien avec les données expérimentales, mais qui ne permettent de calculer ρ_s qu'au moyen de méthodes d'intégration numérique.

Une récente détermination de ρ_s pour les surfaces de la mer [Miller et autres, 1984] conduit à penser qu'une meilleure estimation est donnée par l'expression:

$$\rho_s = \exp(-1/2 g^2) I_0(1/2 g^2) \quad (16a)$$

dans laquelle I_0 est la fonction de Bessel modifiée d'ordre zéro. Cette expression donne de bons résultats en accord avec les valeurs mesurées des coefficients de réflexion sur la surface de la mer [Beard, 1961].

Une approximation simple est la suivante :

$$\rho_s = \frac{1}{\sqrt{3,2x - 2 + \sqrt{(3,2x)^2 - 7x + 9}}} \quad (16b)$$

avec $x = 0,5 g^2$,

4.2 Amplitude du coefficient de réflexion diffuse

La composante diffuse du signal réfléchi provient de la diffusion sur une grande surface, et ce sont des régions situées bien au-delà de la première zone de Fresnel qui y contribuent le plus. La région dont il s'agit est connue sous le nom de «surface luisante». Cette surface diffuse les signaux sans qu'il y ait aucune direction privilégiée. On peut définir un coefficient de réflexion diffuse:

$$R_d = \rho_d |R| \quad (17)$$

ρ_d étant un coefficient qui dépend uniquement des irrégularités de la surface.

On ne trouve nulle part d'expression simple pour ρ_d . Ce facteur est nul pour une Terre lisse. Il est maximal pour une surface très rugueuse et sa limite supérieure dépend de la directivité de l'antenne et de la nature de la surface. Pour une antenne peu directive au-dessus d'un sol nu ou de la mer, ρ_d est compris entre 0,2 (-14 dB) et 0,4 (-8 dB), sa valeur la plus probable étant de 0,35 pour une surface très rugueuse. Lorsque la surface luisante n'est pas illuminée dans sa totalité du fait que les antennes sont très directives ou que la présence d'un écran ou de végétation introduit une absorption superficielle notable, le facteur ρ_d est inférieur à 0,2 et peut être négligeable.

Des mesures expérimentales et une analyse théorique indiquent que la composante diffuse est statistiquement aléatoire, avec une distribution de Rayleigh.

4.3 Champ réfléchi total

La Fig. 3 représente les coefficients de réflexion spéculaire et de réflexion diffuse mesurés à la surface de la mer [Beard, 1961]. La relation (16) y est également représentée. Le champ total au-dessus d'une surface réfléchissante est la résultante du champ direct, de la composante spéculaire cohérente et de la composante diffuse aléatoire. Le champ résultant obéit à une distribution de Nakagami-Rice. Si l'on admet que la puissance totale diffusée vers l'avant est constante, la relation:

$$\langle \rho_r \rangle^2 + \langle \rho_d \rangle^2 = \text{constante} \quad (18)$$

dans laquelle $\langle \rho \rangle$ indique une valeur quadratique moyenne, peut être utile pour l'estimation du champ réfléchi. Lorsque l'on calcule le champ résultant, on doit également tenir compte de la directivité de l'antenne.

La réflexion sur des surfaces rugueuses fait l'objet d'un certain nombre d'études théoriques. Malheureusement, il n'existe actuellement pas de formules d'ingénierie satisfaisantes qui conviennent pour évaluer les évanouissements dus aux trajets multiples résultant de ce type de réflexion. D'importants progrès ont cependant été obtenus concernant les surfaces de la mer pour des fréquences proches de 1,5 GHz [Karasawa et Shiokawa, 1984]. Le principe de la méthode utilisée pour cette fréquence est probablement valable pour des fréquences moins élevées et pourrait servir de base à l'étude du cas des fréquences plus élevées.

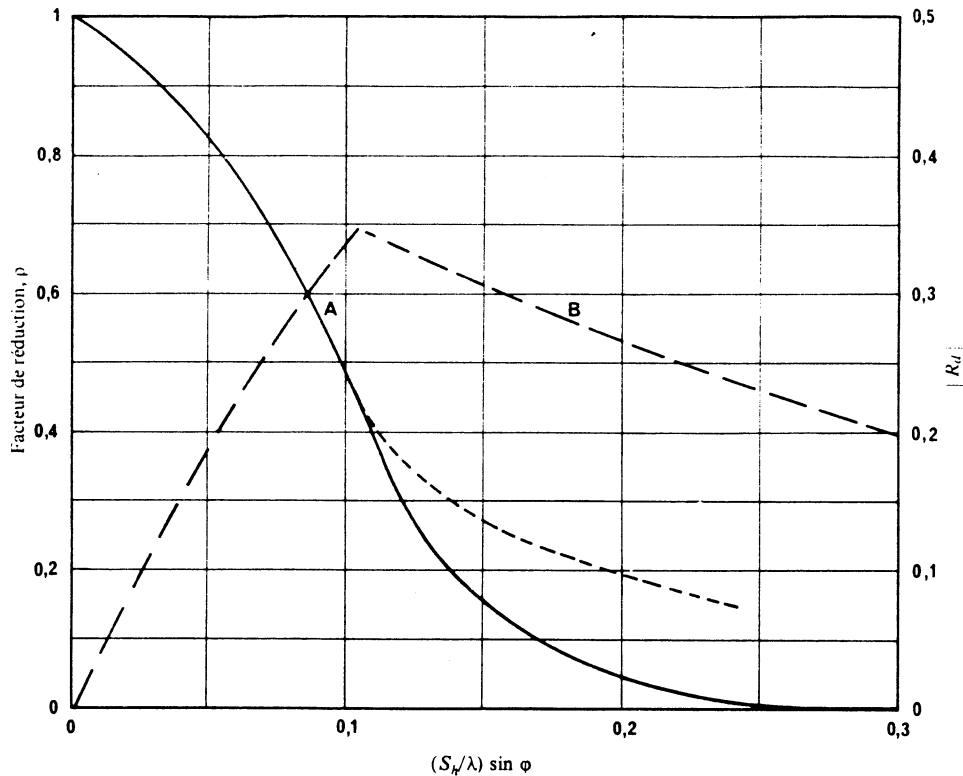


FIGURE 3 – Réflexions par des surfaces rugueuses

La courbe A correspond à la composante spéculaire. La ligne en trait plein est calculée d'après la formule (16). La ligne en tirets représente les données expérimentales.
La courbe B est un coefficient de réflexion diffuse, R_d [Beard, 1961].

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BEARD, C. I. [1961] Coherent and incoherent scattering of microwaves from the ocean. *IRE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-9, 5, 470-483.
- BECKMANN, P. et SPIZZICHINO, A. [1963] *The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces*. Pergamon Press, Oxford, Royaume-Uni.
- BOITHIAS, L. [1984] *Propagation des ondes radioélectriques dans l'environnement terrestre, Collection Technique et Scientifique des Télécommunications*, 2^e édition, Dunod, Paris, France.
- DeSANTO, J. A. [novembre-décembre 1981] Scattering from a rough surface. *Radio Sci.*, Vol. 16, 6, 1021-1024.
- FURNES, N. [1984] Practical results from FM broadcasting coverage in coastal areas and mountainous terrain in Norway. Use of methods to reduce or avoid propagation problems. *Teletronikk*, 1, 57-58.
- HALL, M. P. M. [1979] *Effects of the Troposphere on Radio Communication*. IEE Electromagnetic Wave Series, 8, Peter Peregrinus Ltd., Londres, Royaume-Uni.
- KARASAWA, Y. et SHIOKAWA, T. [juin 1984] Characteristics of L-Band multipath fading due to sea surface reflection. *IEEE Trans. Ant. Prop.*, Vol. AP-32, 6, 618-623.
- KERR, D. E. [1965] *Propagation of Short Radio Waves*. Dover Publications Inc., New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.
- KRAUS, J. D. et CARVER, C. R. [1984] *Electromagnetics*, 3^e édition, McGraw-Hill, Book Company, Inc., New York, NY, Etats-Unis d'Amérique.
- MILLER, A. R., BROWN, R. M. et VEGH, E. [avril 1984] New derivation for the rough-surface reflection coefficient and for the distribution of sea-wave elevations. *IEE Proc.*, Vol. 131, Partie H, 2, 114-116.
- STOKKE, K. N. [1984] Problems concerning FM broadcasting in coastal areas and mountainous terrain. Methods to reduce the influence of such problems. *Teletronikk*, 1, 44-56.