

1D10

14^{èmes} Journées Nationales Microondes
11-12-13 Mai 2005 - Nantes



Modélisation et prise en compte des surfaces rugueuses pour un simulateur de propagation d'ondes à 60 GHz en milieu indoor

YANN COCHERIL, RODOLPHE VAUZELLE, LILIAN AVENEAU, MAJDI KHOUDEIR
Laboratoire SIC, FRE-CNRS 2731, Université de Poitiers
Bat. SP2MI - Teleport 2
Bvd Marie et Pierre Curie - BP 30179
86962 FUTUROSCOPE CHASSENEUIL CEDEX (FRANCE)
{cocheril, vauzelle, aveneau, khoudeir}@sic.sp2mi.univ-poitiers.fr

I. Introduction

Actuellement, les systèmes de télécommunication sans fil évoluent pour satisfaire des besoins toujours croissants en bande passante (augmentation du nombre d'abonnés, transmission de contenus de type multimédia, ...). Dans un futur plus ou moins proche, la fréquence de fonctionnement de ces systèmes augmentera jusqu'à 60 GHz avec l'avènement des systèmes millimétriques tel que le WLAN (Wireless Local Area Network). Cependant leur mise en oeuvre pose de nouveaux problèmes. En effet, les outils de simulation nécessaires au déploiement de systèmes sont validés pour les fréquences actuelles. Seulement, avec la montée en fréquence, de nouveaux phénomènes tels que la diffusion par des surfaces rugueuses, la diffraction par des petits objets ou encore l'interaction avec des personnes peuvent avoir une influence non négligeable sur une transmission. La diminution de la longueur d'onde ($\lambda = 5$ mm à 60 GHz) impose donc une modélisation plus fine de l'environnement si l'on souhaite étudier ces phénomènes.

Dans le cadre de cette étude, nous nous sommes intéressés à la prise en compte du phénomène de diffusion par des surfaces rugueuses pour une propagation d'ondes à 60 GHz en environnement indoor. Plusieurs méthodes numériques permettent de résoudre un tel problème pour des ondes millimétriques incidentes sur une surface rugueuse : les modèles de Khirchhoff [1][3], des petites perturbations [2], ... Ces méthodes sont généralement très lourdes en temps de calcul. De plus, dans le cadre de simulations de la propagation d'ondes dans des environnements réalistes en termes de taille (intérieurs de bureaux à l'échelle d'un bâtiment par exemple) et de complexité (un grand nombre de surfaces de natures différentes), ces méthodes bien que précises sont rapidement limitées par les capacités de calcul actuelles. Alors, dans le souci d'avoir une estimation rapide du phénomène de diffusion par des surfaces rugueuses et de son impact sur la propagation d'ondes en environnement indoor, nous avons opté pour un modèle basé sur un tracé de rayons 3D [5] que l'on modifie de sorte à ce qu'il tienne compte du phénomène de diffusion.

Cette prise en compte se traduit dans un premier temps par la nécessité d'adopter un modèle descriptif de la rugosité. Ensuite, nous présentons comment nous intégrons cette description au sein d'un simulateur basé sur un tracé de rayons 3D. Enfin nous présentons différents résultats obtenus pour des environnements indoor tels que des bureaux.

II. Surfaces rugueuses

II.1 Définition

La rugosité se définit d'après le critère de Rayleigh [3] par la différence de longueur Δl qui existe entre deux rayons réfléchis par une même surface à deux hauteurs différentes (cf. Figure 1). Cette différence de longueur entraîne un déphasage entre les deux rayons. On distingue alors deux comportements de la surface. Lorsque le déphasage est très faible, la surface est considérée lisse, tandis qu'elle est considérée rugueuse si le déphasage est supérieur à un seuil S , comportement d'autant plus accentué si les rayons réfléchis sont en opposition de phase. En fixant le seuil S à $\pi/2$, nous pouvons écrire la relation qui lie la hauteur de la rugosité h d'une surface à la longueur d'onde λ . En effet, une surface est considérée rugueuse si :

$$h \geq \frac{\lambda}{8 \sin \psi} \quad (1)$$

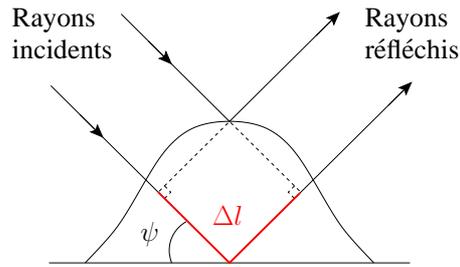


Figure 1 – Différence de longueur entre deux trajets

II.2 Description

Dans le but d'étudier le phénomène de diffusion par les surfaces rugueuses, nous devons connaître la géométrie des surfaces considérées. En effet, nous utilisons une approche basée sur l'optique géométrique et la théorie des rayons dans le simulateur de propagation d'ondes (cf. III.). Nous devons alors savoir comment les rayons intersectant une surface rugueuse seront réfléchis ce qui impose de connaître la géométrie de la rugosité localement aux différents points d'interaction rayon - surface. Nous modélisons alors la surface avec des micro-facettes (notées dans la suite μ -facettes) (cf. Figure 2). Chacune d'entre elles est alors caractérisée par sa hauteur ainsi que par son orientation sur la surface. Lorsqu'un rayon intersecte la surface, et donc une μ -facette (cf. Figure 3), il est réfléchi dans la direction de spécularité de la μ -facette considérée et déphasé selon la hauteur de la μ -facette sur la surface (par rapport à la hauteur moyenne de l'ensemble des μ -facettes). Le phénomène de diffusion par une surface rugueuse résulte alors de l'intégration de ce processus sur un grand nombre de μ -facettes, prises indépendamment les unes des autres (cf. Figure 3).

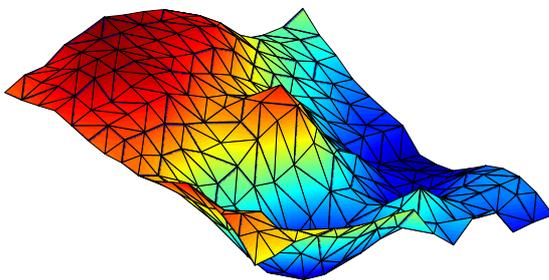


Figure 2 – Décomposition de la surface en μ -facettes

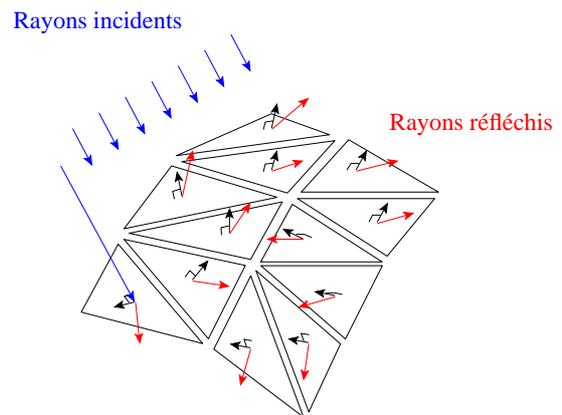


Figure 3 – Comportement indépendant des μ -facettes

Deux méthodes permettent de modéliser une surface rugueuse, donc la position et l'orientation de chacune de ses μ -facettes. La première, dite déterministe, résulte d'un relevé de la surface par capteur à diode laser [8] qui nous fournit une carte des hauteurs, ou cartographie du relief de la surface avec une précision sur les hauteurs mesurées de $1\mu m$. La seconde, dite statistique, s'appuie sur trois lois statistiques [4]. La première loi de ce modèle gère la distribution des hauteurs ($h = f(m_h, \sigma_h)$) des μ -facettes de la surface, utile pour calculer le déphasage produit par chacune d'entre elles. Les deux autres lois gèrent les distributions des pentes dans deux directions orthogonales entre elles ($\delta_x = f(m_x, \sigma_x)$ et $\delta_y = f(m_y, \sigma_y)$), utiles pour calculer les directions de réflexion spéculaire. La méthode déterministe semble a priori la plus fiable, bien que l'exploitation des cartographies pour des environnements réels soit prohibitive et irréalisable pour une raison évidente de stockage. La méthode statistique semble alors plus appropriée bien que les lois statistiques décrivant la surface sont généralement prises gaussiennes et paramétrées de façon arbitraire, ce qui n'est pas forcément représentatif d'un environnement donné. C'est pourquoi nous choisissons d'associer ces deux descriptions en une méthode dite semi-statistique qui, pour des échantillons représentatifs de surfaces réelles rencontrées dans des environnements indoor, utilise les informations extraites de la description déterministe pour paramétrer les trois lois statistiques du modèle statistique [6].

III. Intégration dans un simulateur de propagation d'onde et résultats

III.1 Implémentation

Dans le but d'étudier l'influence de la rugosité des surfaces sur une propagation d'ondes, nous utilisons un logiciel basé sur un tracé de rayons 3D développé au sein du laboratoire [5]. Le travail à mener est donc d'intégrer le modèle semi-statistique établi précédemment (cf. II.2) au sein de ce simulateur. Le tracé de rayons permet de calculer tous les trajets existants entre l'émetteur et le récepteur en tenant compte des phénomènes de transmission, de réflexion établis selon les lois de Snell-Descartes ainsi que de la diffraction établie selon le principe de Fermat généralisé. Si on se restreint aux réflexions, une manière classique d'aborder le phénomène de diffusion par les surfaces rugueuses dans un tracé de rayons est d'utiliser un coefficient de réflexion de Fresnel modifié pour pondérer l'amplitude du rayon réfléchi dans la direction spéculaire (cf. (2)).

$$R_{||,\perp}^{mod} = R_{||,\perp} \times \rho \quad (2)$$

$$\rho = e^{-8\pi^2 \left(\frac{\sigma_h}{\lambda}\right)^2 \cos^2 \theta} \quad (3)$$

avec $R_{||,\perp}$, σ_h et θ respectivement le coefficient de réflexion de Fresnel, l'écart-type des hauteurs de la surface et l'angle d'incidence par rapport à la normale à la surface.

L'inconvénient de ce modèle est qu'il ne modifie que l'amplitude du trajet réfléchi dans la direction de réflexion spéculaire sans tenir compte de l'énergie diffusée dans les autres directions, ce qui n'est pas représentatif du phénomène de diffusion. De plus, nous avons choisi de modéliser la surface rugueuses par des μ -facettes (cf. II.2), ce qui nous permet d'avoir accès à la proportion de facettes orientées dans une direction spécifique, et donc de calculer le champ diffusé dans cette direction. Pour simuler le processus de diffusion sur un grand nombre de μ -facettes, nous choisissons alors d'employer une méthode qui s'appuie sur les techniques de Monte-Carlo telles que celles utilisées en synthèse d'images : le path-tracing [7]. Nous envoyons un grand nombre de rayons depuis l'émetteur, et nous cherchons leurs intersections avec les faces de l'environnement visibles de l'émetteur (cf. Figure 4). Pour les intersections existantes, nous testons leur visibilité avec le récepteur, qui dans le cas positif donne un chemin de propagation entre l'émetteur et le récepteur. L'amplitude du rayon est alors pondérée par la probabilité d'apparition de la μ -facette qui a généré ce rayon. Dès lors, le processus continue récursivement en lançant depuis chaque intersection trouvée un ou plusieurs rayons en fonction des lois statistiques des surfaces associées, et en fonction du nombre d'interactions encore possible pour chaque rayon.

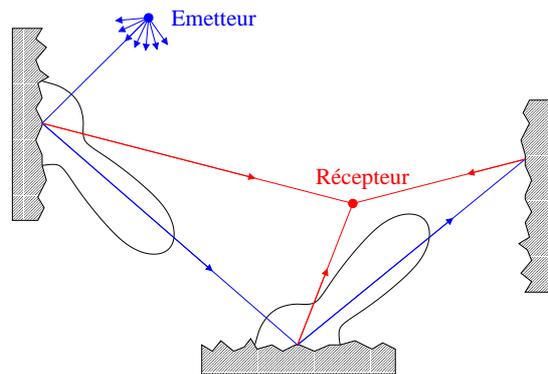


Figure 4 – Principe du path-tracing pour trois réflexions

III.2 Résultats

Des simulations ont été réalisées dans un premier temps pour une pièce cubique avec une rugosité identique pour tous les murs (considérés comme étant en plâtre) à 60 GHz. Les réponses impulsionnelles sont calculées pour différentes valeurs de rugosité (cf. Figure 5) exprimées par différentes valeurs des écart-types des lois sur les hauteurs (σ_h) et sur les pentes (σ_x et σ_y), leurs moyennes respectives étant considérées nulles. Chaque réponse impulsionnelle est la moyenne de

200 réalisations de la propagation entre l'émetteur et le récepteur. Cette statistique est nécessaire puisque nous générons les rayons émis de façon aléatoire ; ainsi nous ne considérons pas de cas particuliers. Sur chaque figure (cf. Figure 5) sont tracées la réponse impulsionnelle obtenue par un tracé de rayons classique lorsque les surfaces sont considérées lisses et celle obtenue avec la méthode path-tracing pour un degré de rugosité donné.

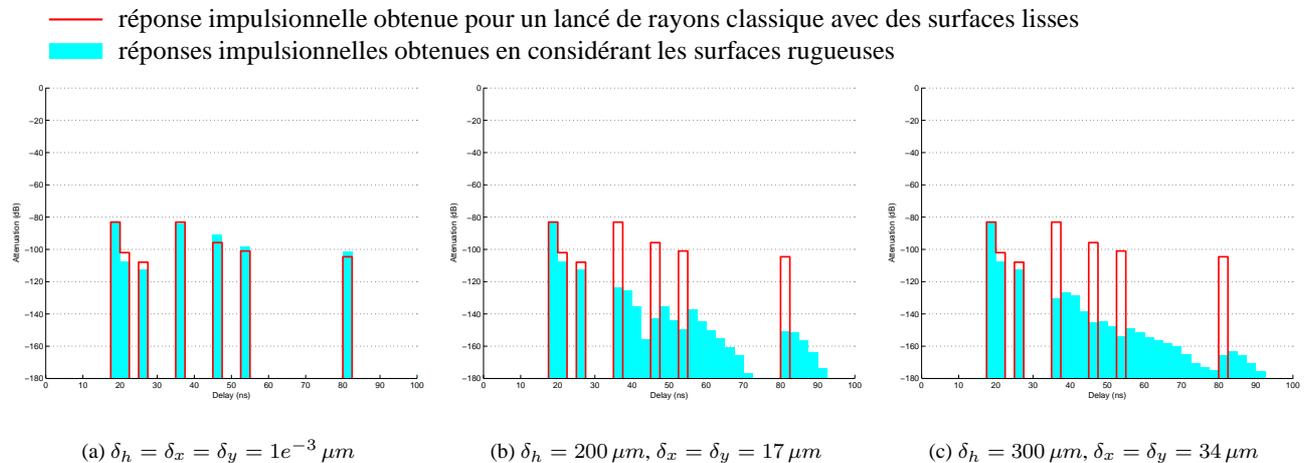


Figure 5 – Résultats de réponses impulsionnelles pour une pièce cubique pour différentes tailles de rugosité

Les résultats obtenus traduisent bien le phénomène de diffusion. En effet, lorsque la surface est quasiment lisse (cf. Figure 5(a)), on retrouve bien les trajets prépondérants obtenus avec le tracé de rayons classique. On peut noter par contre une différence au niveau des amplitudes liée à la méthode utilisée. Lorsque la rugosité augmente (cf. Figure 5(b) et Figure 5(c)), l'énergie située dans les trajets prédominants se disperse autour de ces derniers ce qui a pour effet de réduire leurs amplitudes et de créer ainsi de nouveaux trajets plus retardés. Le phénomène s'amplifie lorsque la rugosité augmente.

IV. Conclusion et perspectives

Une technique permettant de prendre en compte la rugosité de manière plus approfondie qu'une simple méthode de réduction de l'amplitude dans la direction de réflexion spéculaire est implémentée et fonctionnelle. De plus, elle est relativement rapide à l'exécution (selon le nombre de rayons qu'on envoie et le nombre d'itérations du processus). Il faut cependant passer par une phase de validation par la mesure ou par une méthode rigoureuse telles que les méthodes intégrales par exemple. Enfin, il reste à mener une étude avancée de l'influence des paramètres tels que le degré de rugosité, la complexité de l'environnement, la nature des matériaux, ...

Références

- [1] J.A. Ogilvy, *Theory of Wave Scattering from Random Rough Surfaces*, Hilger, 1991.
- [2] F.T. Ulaby, R.K. Moore, A.K. Fung, *Microwave Remote Sensing : Active and Passive* vol 2, Addison-Wesley, 1982.
- [3] P. Beckmann, A. Spizzichino, *The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces*, Pergamon, 1963.
- [4] D. Didascalou, M. Dottling, N. Geng, W. Wiesbeck, *An Approach to Include Stochastic Rough Surface Scattering Into Deterministic Ray-Optical Wave Propagation Modeling*, IEEE Trans. on Antennas and Prop., vol. 51, N°7, Juillet 2003.
- [5] F. Escarieu, Y. Pousset, R. Vauzelle, L. Aveneau, *Outdoor and indoor channel characterization by a 3D simulation software*, IEEE PIRMC'2001, San Diego, Octobre 2001.
- [6] Y. Cocheril, R. Vauzelle, L. Aveneau, M. Khoudeir, *Rough Surfaces Influence on an Indoor Propagation Simulation at 60 GHz*, ECPS 2005 Conference, Brest, Mars 2005.
- [7] P. Shirley, *Physically Based Lighting Calculations for Computer Graphics*, PhD thesis, University of Illinois, Novembre 1990.
- [8] H. Zahouani, R. Vargiolu, M.T. Do, *Characterization of Microtexture Related to Wet Road/Tire Friction*, AIPCR/PIARC, Juin 2000.