Caractérisation du champ électrique en milieu urbain basée sur une méthode utilisant des courants équivalents

Characterization of the electric field in urban environment based on a method using equivalent currents

S. Mostarshedi[*], Y. Ouattara[*], E. Richalot[*], J.M. Laheurte[*], M.F. Wong[**], J. Wiart[**] et O. Picon[*]

[*] *Laboratoire ESYCOM, Université Paris-Est Marne-la-Vallée, Marne-la-Vallée, France*

[**]*Orange Labs R&D, Issy-les-Moulineaux, France*

Résumés

Le champ électrique en milieu urbain est caractérisé en utilisant des méthodes basées sur les courants équivalents et en séparant la zone de calcul en deux parties : une zone proche du bâtiment et une zone lointaine. La méthode utilisée dans la première zone est basée sur les fonctions de Green associées à l'interface entre deux milieux semi-infinis. Elle prend en compte la taille et la nature des détails architecturaux se trouvant sur la façade, par exemple les fenêtres. La méthode utilisée dans la deuxième zone est basée sur le calcul de la Surface Equivalente Radar (SER) et utilise des façades homogénéisées pour les bâtiments. Les deux méthodes étant adaptées à leur zone d'application, elles rendent l'ensemble de la caractérisation du champ électromagnétique dans l'environnement urbain plus rapide et précise.

Mots clés : coefficient de réflexion, fonctions de Green, surface équivalente radar (SER), milieu urbain

The electric field in urban environment is characterized by using two methods based on equivalent currents and by separating the calculation region into two parts: an area near the building and a distant zone. The method used in the first zone is based on Green's functions associated with the interface between two semi-infinite media. It takes into account the size and the nature of the architectural details on the facade, e.g. windows. The method applied in the second zone is based on the calculation of Radar Cross Section (RCS) and uses homogenized facades for buildings. Both methods being appropriate to their respective area of application; they make the whole characterization of the electromagnetic field in urban environment faster and more accurate.

Key words: reflection coefficient, Green's functions, radar cross section (RCS), urban environment

Introduction

Les modèles de champs électriques en milieu urbain devront être de plus en plus précis afin de déterminer la couverture optimale soit en termes de consommation, soit en termes de sécurité des personnes. Or les simulateurs de la propagation d'onde avec les modèles spécifiques au site, actuellement basés, pour la plupart, sur des méthodes de rayons, ainsi que les modèles empiriques basés sur des mesures pour lesquelles les incertitudes sont importantes, ne prennent pas en compte toute la complexité du champ électrique [1]. Malgré l'augmentation des performances des ordinateurs, la taille des scènes à étudier en milieu urbain rend pratiquement impossible l'idée d'entreprendre leur étude à l'aide de méthodes de modélisation précises. Par ailleurs, afin de déterminer les incertitudes liées à une description imprécise des scènes étudiées, nous souhaitons pouvoir réaliser l'étude d'une grande variété de scènes, ce qui nécessite l'emploi d'une méthode numérique à la fois précise et rapide. Ceci permet d'obtenir des informations statistiques plus précises sur les grandeurs caractéristiques de la propagation en milieu urbain.

Les modèles théoriques existant dans la littérature utilisent d'une manière générale deux stratégies différentes concernant les détails architecturaux. Soit ils utilisent un coefficient de réflexion homogénéisé pour l'ensemble de la façade [2], soit ils tiennent compte des détails architecturaux en choisissant des hypothèses appropriées sur certains paramètres concernant les détails, par exemple la distribution des fenêtres [3]. Une solution intermédiaire, basée sur un modèle théorique, est proposée

dans cet exposé. Elle consiste à introduire deux zones de calcul, l'une proche des bâtiments, l'autre lointaine. En effet, lorsqu'on se trouve près des bâtiments, les détails des façades influent sur la valeur du champ réfléchi : si on se trouve près d'une fenêtre, le coefficient de réflexion lié au verre aura une plus grande influence que le coefficient de réflexion du béton qui l'entoure. A grande distance, au contraire, les détails de la façade sont moins importants. La prise en compte d'un coefficient de réflexion moyen suffit. Il résulte d'une homogénéisation sur les façades. Dans ce cas un calcul de type « surface équivalente radar » (SER) est utilisé pour estimer le champ réfléchi par plusieurs bâtiments entre lesquels des réflexions multiples peuvent avoir lieu. Les méthodes seront présentées ici pour des façades planes. Rappelons que la zone de champ lointain (au-delà de $2D^2/\lambda$) pour une façade de 12 m de côté (D) commence à 850 m du bâtiment pour une fréquence de 900 MHz et à 2 km pour une fréquence de 2,2 GHz. On constate donc qu'en milieu urbain, on est très souvent en zone de champ proche rayonnant (avant $2D^2/\lambda$ d'après le standard IEEE [4]).

1. Etude de la réflexion en zone de champ proche

1.1. Principe de la méthode

Le champ réfléchi est calculé par une méthode de fonction de Green. Nous considérons dans un premier temps un matériau de type béton dont l'épaisseur est celle des murs de construction. L'atténuation des ondes aux fréquences utilisées (de l'ordre du GHz et au delà) dans le béton est telle qu'on peut considérer que l'onde qui pénètre dans le béton ne revient pas. Cela permet de dire que, du point de vue de la réflexion, le mur de béton est équivalent à un diélectrique semi infini.

Considérons alors une onde arrivant sur un matériau semi infini. Le principe d'équivalence permet d'introduire des courants surfaciques équivalents, électriques et magnétiques, qui, placés à l'interface entre l'air et le diélectrique, jouent le rôle de sources secondaires. Ceux-ci sont liés à la forme de la source. Nous nous limiterons, dans l'exposé, au cas d'une onde plane incidente. Pour une source plus complexe, la connaissance du comportement d'une somme d'ondes plane sera utilisée.

La somme des contributions au rayonnement de chaque courant élémentaire détermine le champ réfléchi en un point selon l'équation :

$$\vec{E} = \iint \overline{\overline{G}}_{EJ} \bullet \vec{J}.\vec{ds} + \iint \overline{\overline{G}}_{EM} \bullet \vec{M}.\vec{ds} \qquad (1)$$

Les tenseurs de Green introduits dans cette équation sont calculés analytiquement par une méthode qui a été proposée par les auteurs, consistant à calculer les potentiels électromagnétiques en utilisant les équations de Maxwell et les conditions de passage [5]. Les diélectriques étant considérés comme semi infinis, les différentes fonctions intervenant dans ces tenseurs ne présentent pas de pôle. Il en résulte une grande précision du calcul de même qu'une grande rapidité. Ces calculs tiennent compte de la permittivité complexe des matériaux.

Pour une représentation réaliste des façades, la présence de vitres a également été modélisée. Dans ce cas, la faible épaisseur du milieu ne permettant plus de le considérer comme semi infini, une méthode a été proposée [6]. Elle consiste à calculer la permittivité d'un milieu semi infini équivalent qui a les mêmes propriétés pour la réflexion que le vitrage considéré. La permittivité équivalente de ce matériau est déterminée par résolution d'une équation non linéaire et dépend de l'angle d'incidence. Les tenseurs de Green associés ne présentent pas de pôle et sont du même type que ceux du béton.

Dans l'équation (1), il est à remarquer que :
- Les tenseurs de Green portent l'information sur la nature des matériaux considérés et sur l'angle d'observation
- Les bornes d'intégration rendent compte de la taille de la surface des matériaux
- Les courants tiennent compte de la forme de la source.

Il est ainsi possible de découpler ces différents effets et d'en déduire leur influence. La détermination du champ réfléchi par des murs formés de matériaux différents est particulièrement aisée.

La figure 1 présente le champ réfléchi à 100 m d'une façade carrée de 12 m de côté, formée de béton (ε_r=6,13− 0,13i) et percée de fenêtres de 2m × 1,5m, et illuminée par une onde plane en polarisation TE à 900 MHz. On constate la grande variabilité du champ électrique en fonction des vitres utilisées.

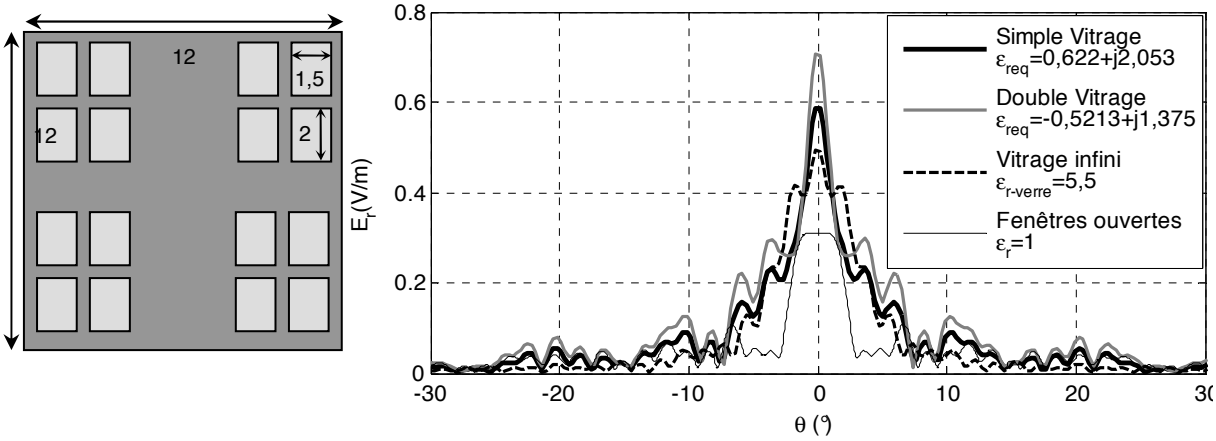

Figure 1. Façade d'un bâtiment béton-verre et son diagramme de rayonnement en fonction du type de vitrage

Les fonctions de Green donnent un résultat avec une bonne précision en quelques minutes pour cet exemple. Des études statistiques sur les différents types de matériaux et paramètres géométriques du bâtiment sont alors possibles compte tenu des temps calculs.

1.2. Etude statistique

Pour un milieu aussi complexe et variable que l'environnement urbain, l'étude statistique du champ électromagnétique s'avère essentielle. Dans la littérature, les études statistiques ont donné naissance à des modèles statistiques [1] pour la caractérisation du champ électromagnétique. Quant aux simulateurs utilisant un modèle déterministe de l'environnement urbain, comme celui utilisé dans cet article, les études statistiques du champ peuvent être utilisées pour faire ressortir les paramètres les plus influents de la façade des bâtiments. Le modèle utilisé dans le simulateur se simplifie en supprimant les paramètres les moins influents, le temps de calcul du simulateur se réduit ainsi tout en conservant une bonne précision des résultats.

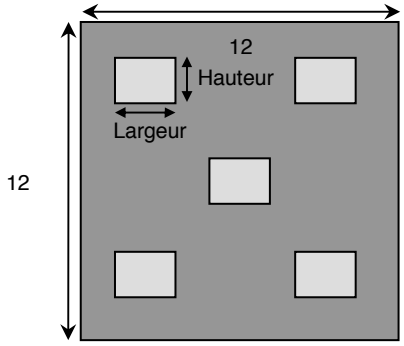

Figure 2. Façade d'un bâtiment béton-verre

Afin de justifier le choix de deux zones différentes de calcul dans cet exposé, les résultats des études statistiques sur un des paramètres de la façade, les dimensions des fenêtres, sont présentés ici. La figure 2 présente une façade générique de bâtiment avec les mêmes matériaux que ceux de la figure 1. La largeur des fenêtres est considérée d'abord constante (1,5 m) et la hauteur varie selon la loi normale de N(2 m ; 0,4 m), ensuite la largeur varie suivant la loi normale et la hauteur reste constante. La façade est illuminée par une onde plane en polarisation TE et en incidence normale. Pour 2500 échantillons des dimensions des fenêtres, l'influence de la variation de la largeur et de la hauteur des fenêtres est observée dans la direction spéculaire et dans deux zones différentes de la façade : champ proche (à 25 m de la façade) et champ lointain (à 1000 m). A cette fin, le coefficient de variation, une mesure de la dispersion sans unité, est défini en divisant l'écart type (σ) par la moyenne (μ). Pour 20% de variation sur les dimensions des fenêtres, le champ réfléchi par la façade

varie de 15% dans la zone du champ proche et de 1% dans la zone du champ lointain. Cette étude statistique montre que l'influence des dimensions des fenêtres est uniquement importante dans la zone du champ proche du bâtiment et un modèle homogénéisé dans la zone du champ lointain peut donner des résultats suffisamment précis, ce qui nous conduit à la deuxième méthode de calcul dans la section suivante.

2. Calcul du champ lointain réfléchi par un ou plusieurs bâtiments

Lorsqu'on se place plus loin, l'influence des détails disparaît. L'approche consiste à considérer un coefficient de réflexion moyen adapté à la constitution de chaque façade. Une méthode de type optique physique [7] permet de calculer la SER de chaque façade. Dans le cas d'une façade de forme rectangulaire illuminée par une onde plane en polarisation TE, l'expression de la SER bistatique est connue analytiquement et peut se réduire à la formule (2) :

$$\sigma(\theta,\varphi) = 4\pi\left|R_{eq}\right|^2\left(\frac{Wh}{\lambda}\right)^2\cos^2(\theta_i-\alpha)\left(\cos^2\theta_s\cos^2\varphi_s+\sin^2\varphi_s\right)\left[\frac{\sin X}{X}\right]^2\left[\frac{\sin Y}{Y}\right]^2 \qquad (2)$$

où :

$$Y = \frac{\beta W}{2}\cos\alpha\left[\sin\theta_s\sin\varphi_s-\sin\theta_i-\tan\alpha\left(\cos\theta_s+\cos\theta_i\right)\right]$$

$$X = \frac{\beta h}{2}\left[\sin\theta_s\cos\varphi_s\right]$$

W et h sont les dimensions de la façade (cf. Figure 4). θ_i, φ_i, θ_s et φ_s représentent respectivement les angles d'incidence et d'observation en élévation et en azimut. L'angle d'inclinaison de la façade par rapport à l'axe Y est noté α (cf. Figure 4). Le coefficient de réflexion équivalent R_{eq} est le coefficient de Fresnel complexe tenant compte de l'épaisseur du matériau de la façade.

Le champ électrique total diffusé en zone lointaine par un ensemble de façades est obtenu en utilisant les différentes SER calculées ci-dessus par application de la formule (3) :

$$E_{\text{reconstruit}} = \sum_{i=1}^{N}\frac{\sqrt{\sigma_i}}{\sqrt{4\pi r_i}}e^{-kr_i}e^{j\varphi_i} \qquad (3)$$

Les r_i sont les distances moyennes entre le centre de phase de chaque façade illuminée et le point d'observation. La phase φ_i représente le retard de l'onde incidente sur chacune des façades. Dans le cadre d'une scène complexe, une approche stochastique comme préconisée dans [8] est envisageable.

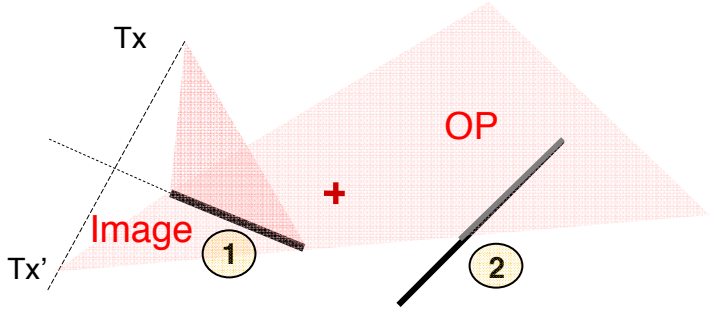

Figure 3. Principe de calcul de la SER liée à la réflexion de second ordre

Lorsque des réflexions multiples apparaissent entre les bâtiments, leur contribution est également prise en compte dans la formule (3). Les SER correspondant aux réflexions multiples du champ

incident sont déterminées en combinant les méthodes de l'optique géométrique (OG) et de l'optique physique (OP). Dans la figure 3, le faisceau incident est réfléchi une première fois par la façade 1 puis par la façade 2 : nous appellerons cette composante C12. La zone illuminée de la façade 2 après réflexion sur la façade 1 est déterminée par la théorie des images ; l'optique physique est ensuite appliquée sur cette zone afin d'en déduire la SER liée de la double réflexion C12.

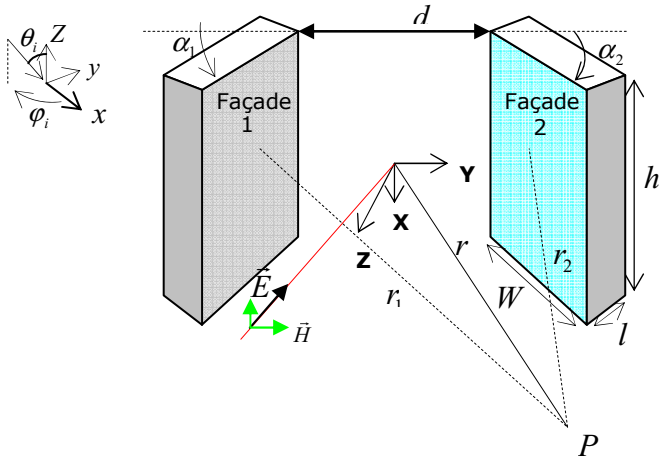

Figure 4. Modèle simplifié de réflexion d'une scène urbaine

Sur la figure 5 nous présentons le module du champ électrique réfléchi par deux bâtiments distants de deux longueurs d'onde, faisant un angle de 30° chacun avec l'axe de référence. Les façades sont illuminées sous une incidence de 30° par d'une onde plane en polarisation TE à 900 MHz (cf. figure 4). La façade 1 est constituée de béton ($\varepsilon_r = 9 - 2i$) et la façade 2 essentiellement en verre ($\varepsilon_r = 6 - 2i$). Le module du champ électrique obtenu par notre approche est comparé à celui du logiciel commercial HFSS d'Ansoft. De ce fait , les dimensions des batiments ont été choisies dans les limites du simulateur HFSS soit $W \times h = 5\lambda \times 5\lambda$, identiques pour les deux batiments, avec une épaisseur l de 30 cm pour le béton et 1 cm pour le verre. La simulation a été effectuée en champ lointain de chaque batiment.

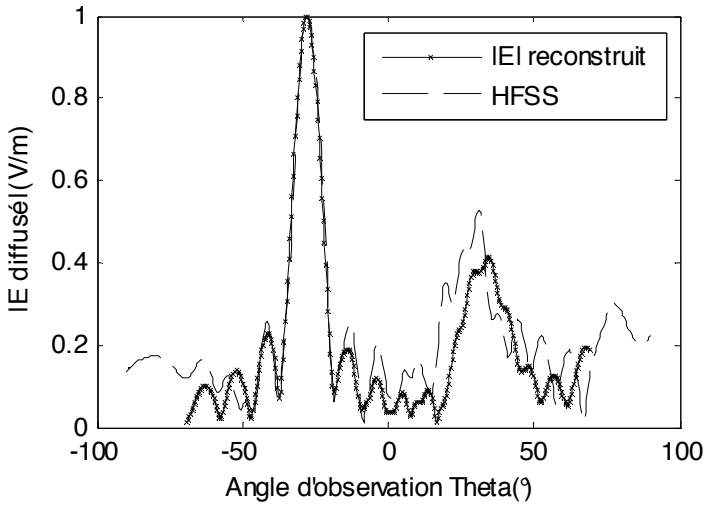

Figure 5. Comparaison entre la simulation HFSS et notre approche en champ lointain basée sur la SER. Distance d'observation r=100λ

On peut remarquer une bonne corrélation des résultats obtenus par notre méthode et ceux du logiciel HFSS. On observe bien une réflexion spéculaire sur l'une des façades (rétrodiffusion sur la façade 2) par la valeur importante du champ, mais aussi une réflexion secondaire sur l'autre bâtiment, liée à une double réflexion C12.

3. Conclusion

Dans ce travail, nous avons présenté deux méthodes basées sur le calcul de courants équivalents sur une façade, crées par le rayonnement d'une source sur des bâtiments. L'utilisation de deux méthodes adaptées à la distance entre les façades et le point de réception, permet d'utiliser des méthodes simples et précises dans chaque zone de calcul. Du fait du calcul analytique, poussé assez loin sur des fonctions de Green ne présentant pas de pôle, les calculs numériques prennent un temps limité.

La combinaison de ces deux méthodes a donc l'avantage d'être rapide tout en étant précise. Elle permet d'améliorer la connaissance du champ en milieu urbain car elle peut prendre en compte une complexité importante.

Références bibliographiques

[1] ISKANDER, M.F. and YUN, Z.: 'Propagation prediction models for wireless communication systems', IEEE Trans. Microwave Theory Tech., 2002, 50, (3), pp. 662–673.
[2] LANDRON, O., FEUERSTEIN, M. and RAPPAPORT, T.S.: 'A Comparison of Theoretical and Empirical Reflection Coefficients for Typical Exterior Wall Surfaces in a Mobile Radio Environment', IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 1996, 44, (3), pp. 341–351.
[3] PONGSILAMANEE, P. BERTONI, H.L.: 'Specular and nonspecular scattering from building facades', IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2004, 52, (7), pp. 1879–1889.
[4] 'IEEE standard definitions of terms for antennas', IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1969, 17, (3), pp. 262–269.
[5] MOSTARSHEDI, S., RICHALOT, E., LAHEURTE, J. M., WONG, M. F., WIART, J. and PICON, O.: 'Fast and Accurate Calculation of Scattered EM Fields from Building Faces Using Green's Functions of Semi-Infinite Medium', IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2009, accepted to be published.
[6] MOSTARSHEDI, S., RICHALOT, E. and PICON, O.: 'Semi-infinite reflection model of a multilayered dielectric through equivalent permittivity calculation', Microwave and Optical Technology Letters, 2009, 51, (2), pp. 290–294.
[7] KONG, J. A.: 'Electromagnetic wave theory' John Wiley & Sons, 1986, New York, pp. 527–587.
[8] CRISPIN, J. W. and MAFFETTE, A. L.: 'Radar cross section estimation for complex shapes', Proceedings of the IEEE, 1965, 53, (8), pp. 972–982.