

DETERMINATION DE LA PERMITTIVITE COMPLEXE DE MATERIAUX DE CONSTRUCTION DANS LE DOMAINE MICROONDE : COMPARAISON DES METHODES DE FRESNEL ET D'ELLIPSOMETRIE PAR REFLEXION

F. SAGNARD, C. VIGNAT, V. MONCOURTOIS, E. ROLLAND
Laboratoire Systèmes de Communication, Université de Marne-La-Vallée,
5, Bd Descartes, Champs-sur-Marne, 77454 Marne-La-Vallée Cedex 02, France
email : sagnard@univ-mlv.fr, web : www.univ-mlv.fr/crmo

I. Introduction

L'optimisation des performances des systèmes de communications sans fil utilisés à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments nécessite la modélisation des canaux de propagation. Les modèles physiques, fondés sur les méthodes des images ou du lancer de rayons, visent à déterminer les trajets réfléchis et transmis d'une onde électromagnétique lors de sa propagation à travers différents matériaux du bâtiment. Ces modèles nécessitent donc la connaissance a priori des propriétés électriques des matériaux constitutifs. Dans cet article, nous présentons un nouveau montage expérimental qui permet la mesure de la puissance réfléchie par un matériau plan homogène ou stratifié, selon deux configurations : en fonction de l'angle d'incidence θ_i de l'onde (méthode de Fresnel), ou en fonction de l'angle axial A de l'antenne de réception (ellipsométrie par réflexion).

La difficulté principale associée à la méthode de Fresnel réside dans le fait que la contribution du trajet direct au champ détecté varie en fonction de l'angle d'incidence. Cette difficulté n'est pas rencontrée dans la méthode d'ellipsométrie par réflexion. Cette méthode, adaptée ici pour la première fois au domaine microonde, opère à un angle d'incidence fixe ; elle consiste à mesurer les paramètres de l'ellipse de polarisation associés au champ électrique après son interaction avec le matériau [1]. La connaissance de ces paramètres permet de déterminer la permittivité complexe du matériau.

Des méthodes numériques spécifiques à ces deux configurations, basées sur une optimisation par moindres carrés, ont été conçues. Ces méthodes permettent aussi de comparer les performances des deux configurations, ainsi que les incertitudes des estimateurs associés, ceci dans les cas de matériaux de natures et d'épaisseurs e différentes.

II. Développements théoriques

II-1. La méthode de Fresnel

La méthode de Fresnel consiste à mesurer, pour les deux polarisations parallèle (p) et perpendiculaire (s) au plan d'incidence, le champ électrique réfléchi par le matériau en fonction de l'angle d'incidence θ_i [2]. Dans le cas de milieux homogènes ou homogénéisables, les coefficients de réflexion associés s'expriment sous la forme analytique générale :

$$\tilde{r}(f, \theta_i) = \frac{1 - \exp(-j\beta)}{1 - \tilde{r} \exp(-j2\beta)} \tilde{r} \quad (1)$$

où : $\beta = k_0 e \sqrt{\tilde{\epsilon}_r - \sin^2 \theta_i}$ représente la constante complexe de propagation à travers le matériau, $k_0 = 2\pi / \lambda_0$ le nombre d'onde dans l'air, λ_0 la longueur d'onde dans l'air, $\tilde{\epsilon}_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$ la permittivité complexe relative de l'échantillon et \tilde{r} le coefficient de réflexion de l'interface air-matériau.

θ_i

Remplaçant $\tilde{r}' = \tilde{r}_p$ (respectivement $\tilde{r}' = \tilde{r}_s$) dans l'expression (1), et considérant les relations définissant à \tilde{r}_p et \tilde{r}_s en fonction de θ_i et $\tilde{\epsilon}_r$:

$$\tilde{r}_p = \frac{\sqrt{\tilde{\epsilon}_r - \sin^2 \theta_i} - \tilde{\epsilon}_r \cos \theta_i}{\tilde{\epsilon}_r \cos \theta_i + \sqrt{\tilde{\epsilon}_r - \sin^2 \theta_i}} \quad (2a)$$

$$\tilde{r}_s = \frac{\cos \theta_i - \sqrt{\tilde{\epsilon}_r - \sin^2 \theta_i}}{\cos \theta_i + \sqrt{\tilde{\epsilon}_r - \sin^2 \theta_i}} \quad (2b)$$

Les coefficients de réflexion de Fresnel, pour les deux polarisations parallèle (p) et perpendiculaire (s), sont mesurés en retranchant à la puissance détectée la puissance mesurée lorsque les deux antennes sont face-à-face, à une distance $2R$.

Pour estimer la permittivité complexe du matériau, nous avons développé une méthode qui consiste en les étapes suivantes :

- 1) Une première estimation de la permittivité complexe $\tilde{\epsilon}_0$ est déduite d'un abaque où sont tracées, dans le plan (ϵ', ϵ'') , des lignes de niveaux correspondant à des valeurs constantes de $\theta_{B_{rewster}}$ et du rapport $|\tilde{r}_p / \tilde{r}_s|^2$. Cette approche est justifiée par la faible dépendance de la position du minimum de $|\tilde{r}_p / \tilde{r}_s|^2$ avec l'épaisseur du matériau pour les cas étudiés.
- 2) La prise en compte des incertitudes de mesure permet de déterminer un parallélogramme d'incertitude centré sur $\tilde{\epsilon}_0$. L'échantillonnage régulier de ce parallélogramme génère un grand nombre de permittivités complexes $\tilde{\epsilon}_{ech}$ à chacune desquelles est associée une paire de courbes exprimant $|\tilde{r}_p|^2$ et $|\tilde{r}_s|^2$ en fonction de l'angle d'incidence θ_i .
- 3) A l'aide d'une méthode des moindres carrés pondérés, la paire de courbes qui approche au mieux les données de mesure est déterminée : la permittivité complexe correspondant à ce jeu de courbes est adoptée comme la meilleure estimation de $\tilde{\epsilon}$.

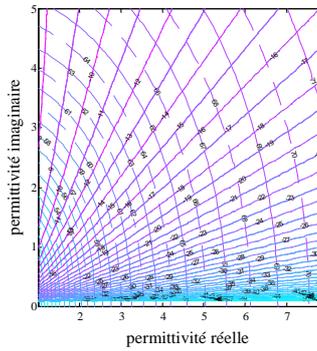


Figure 1 : Abaque de lignes de niveaux de valeurs θ_i et $|\tilde{r}_p / \tilde{r}_s|^2$ constantes, à 10 GHz, pour un matériau d'épaisseur infinie (méthode de Fresnel avec $\tilde{\epsilon} = 3.5 - j$)

II-1. La méthode d'ellipsométrie par réflexion

La méthode ellipsométrique consiste à mesurer, à angle d'incidence θ_i fixé, la puissance $I_d = f(A)$ du champ électrique réfléchi par le matériau en fonction de l'angle axial A de l'antenne de réception. Par souci de simplification, l'angle de polarisation de l'antenne d'émission est fixé à $P = \pm\pi / 4$ [3] : dans ce cas, la puissance du champ électrique réfléchi a pour expression :

$$I_d = I [1 - \cos(2A) \cos(2\psi_r) \pm \sin(2A) \sin(2\psi_r) \cos(\Delta_r)] \quad (3)$$

où I est la puissance réfléchie moyenne, et où ψ_r et Δ_r sont les angles traduisant respectivement les modifications d'amplitude et de phase subies par les composantes parallèle et perpendiculaire du champ électrique lors de sa réflexion. L'estimation de la permittivité complexe $\tilde{\epsilon}$ nécessite la détermination préliminaire du rapport des coefficients de réflexion correspondant aux deux polarisations:

$$\tilde{\rho} = \frac{\tilde{r}_p}{\tilde{r}_s} = \tan(\psi_r) e^{j\Delta_r} \quad (4)$$

Pour cela, deux paramètres mesurables et caractérisant l'ellipse de polarisation du champ reçu sont extraits de la courbe $I_d = f(A)$: le rapport (I_{\min} / I_{\max}) d'une part, et l'angle de rotation axiale α correspondant au premier maximum de cette courbe d'autre part.

Définissant :

$$\tan \chi = \sqrt{\frac{I_{\min}}{I_{\max}}} \quad (5)$$

Les paramètres ψ_r et Δ_r peuvent ainsi être déterminés à partir des angles α and χ à l'aide des deux relations fondamentales de l'ellipsométrie :

$$\tan 2\alpha = \tan 2\psi_r \cos \Delta_r \quad (6)$$

$$\sin 2\chi = \sin 2\psi_r \sin \Delta_r \quad (7)$$

A partir de la connaissance de ψ_r et Δ_r , il est possible de calculer $\tilde{\rho}$ à l'aide de (4) et d'en déduire la permittivité complexe $\tilde{\epsilon}$ à partir de (2a) et (2b).

Comme dans le cas de la méthode de Fresnel, nous proposons une méthode numérique ad-hoc [4] pour l'estimation de $\tilde{\epsilon}$, qui consiste en les étapes suivantes:

- 1) Une première estimée $\tilde{\epsilon}_0$ de la permittivité complexe est déduite d'un abaque représentant, dans le plan (ϵ', ϵ'') , des courbes de niveaux associées à des valeurs constantes des variables I_{\max} et α . L'évaluation de la courbe $I_d = f(A)$ associée à $\tilde{\epsilon}_0$ permet d'extraire la valeur du minimum I_{\min} .
- 2) La connaissance des paramètres I_{\min}/I_{\max} et α permet de déterminer, dans un nouvel abaque, représentant, dans le plan (ϵ', ϵ'') des lignes de niveaux correspondant à des valeurs constantes de I_{\min}/I_{\max} et α , une meilleure estimée $\tilde{\epsilon}_1$ de $\tilde{\epsilon}$.
- 3) L'introduction des incertitudes sur les mesures de I_{\max} et α permet de tracer dans le plan précédent un parallélogramme centré sur $\tilde{\epsilon}_1$ dont l'échantillonnage régulier génère un certain nombre d'estimées candidates $\tilde{\epsilon}_{ech}$.
- 4) A chacune de ces estimées est associée une courbe théorique $I_d = f(A)$. La meilleure estimée est alors choisie comme la permittivité qui correspond à la courbe théorique approchant au mieux - au sens des moindres carrés - les données de mesures.

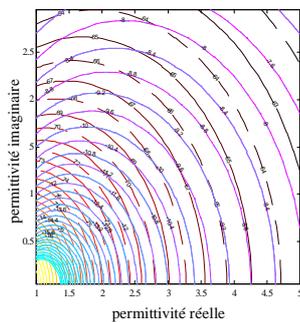


Figure 2 : Abaque de lignes de niveaux de valeurs constantes pour I_{\max} (dB) et α , à 10 GHz, pour un matériau d'épaisseur infinie (méthode ellipsométrique avec $\theta_i = 45^\circ$)

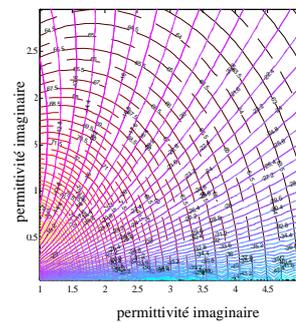


Figure 3 : Abaque de lignes de niveaux de valeurs constantes pour I_{\min}/I_{\max} (dB) et α , à 10 GHz, pour un matériau d'épaisseur infinie (méthode ellipsométrique avec $\theta_i = 45^\circ$)

III. Montage expérimental

Nous avons conçu un montage expérimental permettant la détermination par réflexion de la permittivité complexe $\tilde{\epsilon}$ d'un matériau, selon les deux configurations (Fresnel et ellipsométrie) (figure 1). La source et le détecteur de champ électromagnétique sont des antennes cornet caractérisées par un faible déphasage dans le plan de leur ouverture. Les antennes peuvent tourner autour de leur axe de symétrie (méthode ellipsométrique) et aussi éclairer le matériau sous des angles d'incidence différents. Pour chacune des deux méthodes, deux conditions expérimentales ont été considérées : une distance antenne-point de réflexion (R) égale à 1 m à la fréquence de 10 GHz, et égale à 0.6 m à la fréquence de 8.5 GHz. Ces choix traduisent un compromis visant à optimiser la détection de l'onde réfléchie.

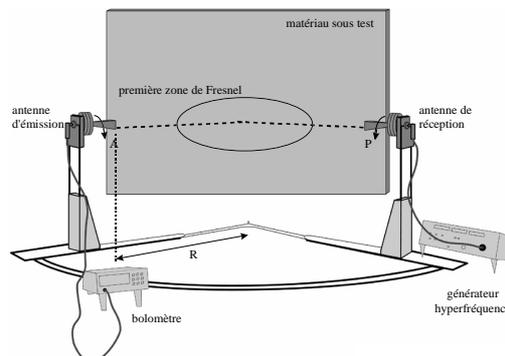


Figure 4 : Banc de mesures pour les 2 configurations

IV. Résultats expérimentaux

Les mesures ont été conduites sur des matériaux de taille moyenne $2 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ dans les cas suivants : un mur en béton ($e = 19.5 \text{ cm}$) et deux plaques de bois aggloméré ($e = 10 \text{ mm}$ et 16 mm). Les incertitudes absolues ont été estimées à $\pm 0.4 \text{ dB}$ pour la mesure de puissance détectée et à $\pm 0.5^\circ$ pour celle de l'angle axial A .

Dans le cas du mur en béton de grande épaisseur, les coefficients de réflexion obtenus par la méthode de Fresnel sont tracés en fonction de l'angle d'incidence sur la figure 5 (a). La méthode des moindres carrés permet d'ajuster au mieux les courbes de mesures et d'obtenir une valeur de permittivité $\tilde{\epsilon}_r = 3.55(\pm 0.29) - 1.19(\pm 0.13)j$. En considérant le rapport de ces coefficients en fonction de l'angle d'incidence, la permittivité estimée est égale à $\tilde{\epsilon}_r = 3.47(\pm 0.29) - 1.23(\pm 0.13)j$. Les écarts importants observés entre les tracés théoriques et les courbes de mesure aux angles d'incidence faibles et grands s'expliquent par l'effet non négligeable du trajet direct des ondes entre les deux antennes. Considérant la méthode ellipsométrique et un angle d'incidence $\theta_i = 45^\circ$, le tracé issu des mesures de la figure 5 (b) présente une allure presque parfaitement sinusoïdale. La permittivité estimée est $\tilde{\epsilon}_r = 3.49(\pm 0.53) - 1.94(\pm 0.53)j$. En conclusion, les valeurs de permittivité complexe obtenues par les différentes méthodes concordent.

Pour conduire des mesures dans le cas de deux plaques différentes, constituées de bois aggloméré (a priori différent) d'épaisseurs ($e = 10\text{ mm}$ et 16 mm) inférieures à la longueur d'onde ($\lambda_0 = 3.5\text{ cm}$ à 8.5 GHz), des absorbants ont été positionnés en face arrière. La méthode des moindres carrés, appliquée aux coefficients de Fresnel étudiés conjointement (figure 6 (a)), permet d'ajuster au mieux les courbes des mesures et de donner l'estimation suivante de la permittivité complexe, soit $\tilde{\epsilon}_r = 2.77(\pm 0.26) - 0.01(\pm 0.18)j$ pour l'épaisseur 10 mm et $\tilde{\epsilon}_r = 2.14(\pm 0.19) - 1.08(\pm 0.13)j$ pour 16 mm . La méthode ellipsométrique (figure 6 (a)) conduit, pour ces deux épaisseurs, aux valeurs de permittivités suivantes : $\tilde{\epsilon}_r = 2.91(\pm 0.43) - 1.15(\pm 0.45)j$ ($\theta_i = 35^\circ$) et $\tilde{\epsilon}_r = 2(\pm 0.39) - 1.7(\pm 0.31)j$ ($\theta_i = 45^\circ$), respectivement. On observe que les estimations de permittivité complexe issues des deux méthodes montrent un accord satisfaisant.

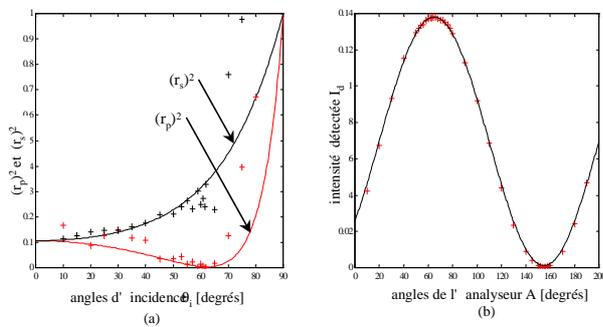


Figure 5: Courbes de mesures et théoriques associées aux méthodes de Fresnel et d'ellipsometrie ($\theta_i = 45^\circ$) dans le cas d'un mur en béton épais

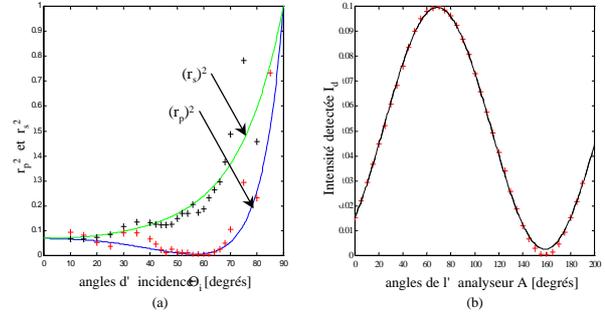


Figure 6: Courbes de mesures et théoriques associées aux méthodes de Fresnel et d'ellipsometrie ($\theta_i = 45^\circ$) dans le cas d'une plaque de bois aggloméré

Les valeurs estimées de la permittivité complexe et les incertitudes associées, en fonction de la méthode de mesure choisie et du matériau utilisé, sont présentées dans le tableau I suivant :

matériau \ méthode	Fresnel	ellipsométrie ($\theta_i = 45^\circ$ sauf dans le second cas où $\theta_i = 35^\circ$)
béton	$\tilde{\epsilon}_r = 3.55(\pm 0.29) - 1.19(\pm 0.13)j$	$\tilde{\epsilon}_r = 3.49(\pm 0.53) - 1.94(\pm 0.53)j$
bois aggloméré $e = 10\text{ mm}$	$\tilde{\epsilon}_r = 2.77(\pm 0.26) - 0.01(\pm 0.18)j$	$\tilde{\epsilon}_r = 2.91(\pm 0.43) - 1.15(\pm 0.45)j$
bois aggloméré $e = 16\text{ mm}$	$\tilde{\epsilon}_r = 2.14(\pm 0.19) - 1.08(\pm 0.13)j$	$\tilde{\epsilon}_r = 2(\pm 0.39) - 1.7(\pm 0.31)j$

Tableau I : Résultats de mesure de permittivités complexes

IV. Conclusion

Les permittivités complexes estimées par la méthode de Fresnel et la méthode d'ellipsométrie sont concordantes, que l'épaisseur des matériaux soit importante ou faible devant la longueur d'onde. Les incertitudes d'estimation semblent plus faibles dans le cas de la méthode de Fresnel ; cependant, notre calcul d'incertitudes ne prend pas en compte les erreurs dues aux variations, avec l'angle d'incidence, du trajet direct et des dimensions de la première zone de Fresnel. En conclusion, l'approche ellipsométrique en réflexion est une nouvelle méthode d'estimation de la permittivité complexe susceptible de concurrencer avantageusement la méthode de Fresnel. Ces résultats nous permettent d'envisager de caractériser des matériaux bicouches.

Références

- [1] P. Stetiu, B. Hannover, "Ellipsométrie en microondes", *Journées JCMM*, mars 2000, Paris, France
- [2] M. Born, E. Wolf, "*Principles of Optics*", Pergamon, Sixth Edition, New York, 1980
- [3] R.M.A. Azzam, N.M. Bashara, "*Ellipsometry and polarized light*", Elsevier, 1999
- [4] F. Sagnard, F. Bentabet, C. Vignat, "*Theoretical study of a new method based on ellipsometry for measurement of complex permittivity of materials*", *Electronic Letters*, vol.36, n.22, pp.1843-45, October 2000