ECAMO et CREMO : deux interfaces graphiques pour comprendre par l'expérimentation le rayonnement et la propagation des ondes électromagnétiques dans le domaine micro-onde

F. Sagnard, C. Vignat, S. Corral[1], V. Moncourtois
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

Résumé : Dans cet article sont présentées deux interfaces graphiques originales sous Matlab. Elles constituent des outils didactiques pour l'interprétation de résultats issus d'expérimentations en rayonnement et propagation dans le domaine micro-onde. Ces interfaces sont intégrées depuis cette année dans deux protocoles de travaux pratiques de second cycle EEA. ECAMO permet de représenter et analyser différents diagrammes de rayonnement d'antennes filaires et cornet. CREMO permet quant à elle d'estimer la permittivité complexe d'un matériau monocouche, plan et homogène à l'aide de deux approches par réflexion, la méthode de Fresnel et l'ellipsométrie. Ces interfaces, programmées de façon modulaire, sont destinées à évoluer en fonction des besoins pédagogiques futurs.

Mots clé : instrumentation, hyperfréquence, propagation, antenne, rayonnement, coefficients de réflexion, interaction onde-matière, permittivité complexe, diélectrique

1. Introduction

L'étude de la propagation des ondes électromagnétiques et des équations de Maxwell qui la régissent apparaît souvent difficile et rebutante aux étudiants de second cycle EEA. Cette difficulté est liée au formalisme vectoriel inhérent à ce domaine, et à l'absence, dans les cas les plus généraux, de solutions analytiques à ces équations. L'outil informatique peut alors apporter une réponse numérique, mais il n'est pas toujours facile de donner un sens physique aux résultats obtenus. Afin de concilier ces deux types d'approches, nous avons développé, sous l'environnement logiciel Matlab, deux nouvelles interfaces : ECAMO (Etude et Caractérisation d'Antennes en Micro-Onde) [1] et CREMO (étude des Coefficients de Réflexion d'après Fresnel et par l'Ellipsométrie Micro-Onde) [2-3]. De tels outils pédagogiques sont une innovation au sein de notre département et nous n'en connaissons pas d'équivalents dans les formations EEA des universités avec lesquelles nous avons des contacts. Ces outils, utilisés lors de séances de travaux pratiques de second cycle EEA de durée estimée à 5H, permettent d'aborder deux problèmes classiques de mesure en électromagnétisme :

- la caractérisation des diagrammes de rayonnement d'une antenne
- l'estimation de la permittivité complexe d'un matériau par réflexion en espace libre.

Ce dispositif ne permet pas pour l'instant le pilotage automatique des appareils de mesure : il vise à aider l'étudiant pour l'exploitation et l'interprétation des résultats de mesure. L'étudiant doit donc préalablement choisir des conditions expérimentales satisfaisantes pour effectuer ensuite, à l'aide des interfaces, l'analyse par étapes des données de mesures. La programmation modulaire des interfaces lui permet d'exercer un regard critique sur la signification physique des résultats obtenus ; par exemple, toutes les étapes algorithmiques sont directement visualisables. Aucune programmation n'est nécessaire lors de ces séances de travaux pratiques : ainsi, l'étudiant peut focaliser son attention sur l'interprétation des phénomènes physiques et sur les aspects expérimentaux ; de plus, la complexité de gestion d'une interface graphique sous Matlab, sans lien propre avec les sujets de travaux pratiques lui est évitée. Enfin, la

[1] Etudiant en Licence EEA à l'UMLV

programmation modulaire des interfaces permet aux enseignants de les faire évoluer en fonction des besoins pédagogiques et du type d'étudiants auquel elles sont destinées.

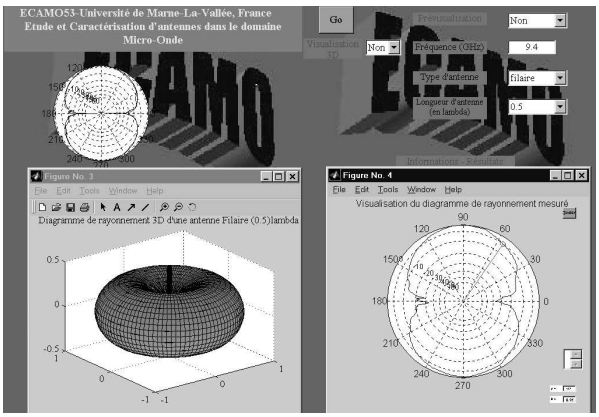

Figure 1 : Interface ECAMO dans le cas d'une antenne filaire $\lambda/2$

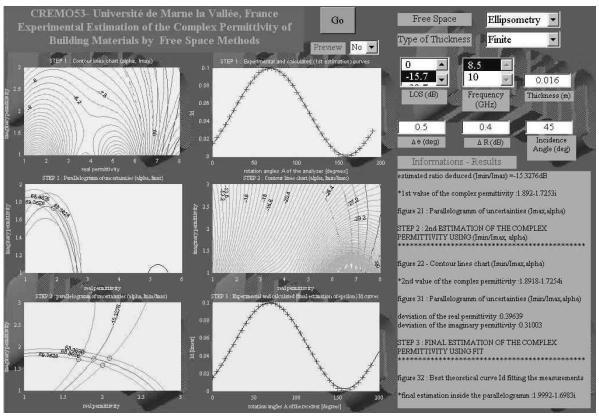

Figure 2 : Interface CREMO dans le cas de l'application de l'ellipsométrie à un matériau d'épaisseur finie

2. Caractéristiques générales des interfaces

ECAMO comme CREMO se présente sous la forme d'une interface divisée en trois parties présentées en figures 1 et 2 : la première partie (en haut à droite) est une zone interactive permettant la sélection des paramètres expérimentaux ; la seconde (à gauche) est destinée à représenter les différentes courbes ; la troisième (en bas à droite) présente une fiche informative de l'évolution des étapes de calcul.

Dans le cas de l'interface ECAMO, les données de mesure sont issues de la chaîne d'acquisition automatisée Cassy de Leybold. Une interface est d'ailleurs fournie avec cette chaîne, mais ses performances se limitent à la définition des paramètres de pilotage et à la visualisation des diagrammes mesurés ; il manquait l'analyse de ces diagrammes, leur confrontation à des diagrammes théoriques et la comparaison de diagrammes issus d'antennes différentes. Ce sont ces raisons qui ont motivé le développement d'ECAMO.

Dans le cas de l'interface CREMO, les données de mesure concernant des matériaux monocouche homogènes sont relevées manuellement par l'étudiant qui les inscrit dans un fichier. L'interface lui permet d'extraire des informations de ces données issues de deux méthodes de mesure en réflexion :

- la méthode de Fresnel (l'amplitude du champ électrique réfléchi est mesurée en fonction de son angle d'incidence variable θ_i sur le matériau),
- la méthode ellipsométrique (l'angle d'incidence θ_i et de polarisation de l'antenne d'émission A étant fixés, les paramètres de la polarisation elliptique du champ électrique réfléchi sont mesurés en fonction de l'angle de rotation axial de l'antenne de réception).

Chacune de ces approches peut être appliquée dans le cas de matériaux d'épaisseur faible ou grande (devant la longueur d'onde du champ électrique). L'interface CREMO permet ensuite d'estimer, à partir des mesures issues de ces quatre configurations, la permittivité complexe du matériau monocouche, à l'aide de méthodes numériques originales basées sur l'utilisation d'abaques ; ces représentations permettent d'expliciter l'influence des incertitudes de mesure sur chacun des estimateurs fournis, et de comparer plus précisément les différentes approches [4-5].

3. ECAMO

Cette interface présente des fonctionnalités essentielles pour la bonne compréhension du principe de fonctionnement d'une antenne filaire simple ou non (ajout éventuel d'un plan

métallique) et d'une antenne cornet. Cette approche peut être facilement étendue à d'autres types d'antennes. En fonction du type d'antenne sélectionné par l'étudiant, une liste de paramètres à définir apparaît dans la zone interactive de l'interface ; à chaque paramètre est associé un cadre de saisie. Cette mise en forme permet à l'étudiant de prendre connaissance des paramètres fondamentaux à définir par type d'antenne lors de la conduite d'une étude de diagramme de rayonnement. Une fois ces paramètres fixés, l'étudiant réalise une étude paramétrique, que ce soit à partir de résultats théoriques ou de résultats expérimentaux, et conduit par la suite des analyses et interprétations. Les fonctionnalités offertes par l'interface ECAMO sont donc nombreuses, et l'étudiant a la liberté de choisir l'ordonnancement des étapes qui lui permettra d'effectuer une étude aussi complète que possible.

La visualisation des diagrammes de rayonnement utilise une représentation polaire et logarithmique, et l'étudiant peut étudier de façon séparée le diagramme de rayonnement théorique, le diagramme mesuré, la superposition des deux ou encore la superposition de plusieurs diagrammes de rayonnement soit théoriques soit expérimentaux (figures 1 et 3). Une représentation satisfaisante de la superposition des diagrammes théorique et expérimentaux nécessite la résolution par l'étudiant des problèmes d'alignement des antennes d'émission et de réception, ainsi que de calibration du banc de mesures. De plus, l'étudiant peut mesurer graphiquement et très précisément l'angle d'ouverture θ_{3dB} caractéristique de l'antenne : pour cela, nous avons programmé la visualisation d'une radiale fictive qui, déplacée à la souris sur le diagramme polaire, permet ainsi de visualiser sans ambiguïté les deux demi-angles d'ouverture θ_{3dB} (figure 1). L'étudiant a aussi la possibilité de visualiser l'allure tridimensionnelle du diagramme d'antenne dans l'espace (dans le cas d'antennes filaires pour le moment), et sa disposition autour de l'antenne (figure 3); une réflexion sur l'adéquation de ce diagramme à certaines contraintes posées par des applications (radiomobiles, radar …) lui est alors demandée.

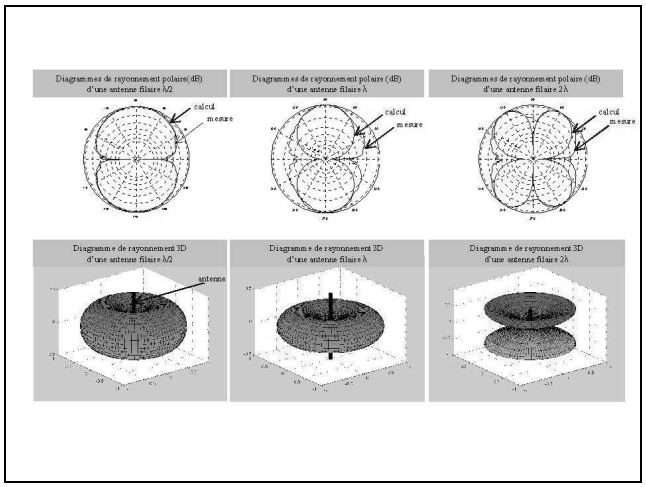

Figure 3 : Visualisation des représentations 3D pour différentes longueurs d'antennes filaires à l'aide de l'interface ECAMO

4. CREMO

Cette interface permet, dans les quatre configurations possibles (méthode de Fresnel ou ellipsométrie, matériau d'épaisseur faible ou grande) d'étudier de façon originale et innovante les problèmes d'interaction onde-matière, et notamment la caractérisation en espace libre de matériaux homogènes monocouche. Il s'agit alors de traiter les puissances mesurées afin d'en extraire une estimation de la permittivité complexe du matériau (figures 2 et 4) et l'incertitude correspondante. La méthode ellipsométrique utilisée depuis plus de 30 ans dans le domaine optique, est à cette occasion adaptée pour la première fois au domaine micro-onde [4-5].

A chacune des configurations sont associés, selon les cas, un ou plusieurs protocoles algorithmiques, que l'étudiant doit mettre en œuvre et interpréter. En fonction de la configuration choisie, une liste de paramètres à définir apparaît dans la zone interactive de l'interface. Comme dans l'interface ECAMO,

l'étudiant visualise rapidement les paramètres fondamentaux propres à chaque configuration. Il lui est notamment possible de comparer les précisions des estimateurs fournis pour chaque configuration, ainsi que l'influence de certains paramètres expérimentaux (fréquence, angle d'incidence, épaisseur…) sur les résultats obtenus. Enfin, un dispositif original à base d'abaques permet d'évaluer très précisément l'influence des erreurs de mesure sur les permittivités estimées. Ces abaques à double réseau de courbes, associées à des paramètres mesurables, permettent de déduire un point d'intersection lors de chaque mesure de matériau, et donc d'obtenir une première estimation des permittivités réelles et imaginaires ; l'existence de ce point d'intersection témoigne de la validité des mesures effectuées par l'étudiant. L'utilisation de l'interface CREMO permet de sensibiliser l'étudiant à la problématique du choix d'une méthode de mesure, et à l'évaluation de sa robustesse.

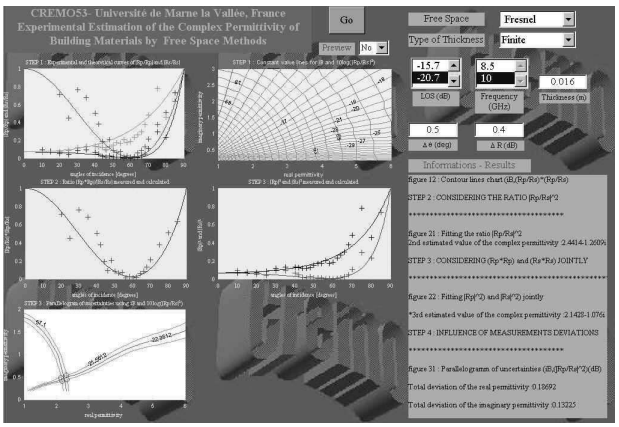

Figure 4 : Interface CREMO dans le cas de l'application de la méthode de Fresnel à un matériau d'épaisseur finie

Pour chacune des méthodes (Fresnel ou ellipsométrie), l'étudiant peut, préalablement à l'estimation de la permittivité complexe, effectuer à l'aide de l'interface une simple visualisation des courbes expérimentales (figures 2 et 4). Une fois cette estimation obtenue, il peut conduire une analyse des courbes expérimentales ou théoriques qui se révèle particulièrement intéressante dans le cas de la méthode ellipsométrique ; par exemple, la comparaison des allures sinusoïdales des intensités théoriques et expérimentales, en fonction de l'angle de rotation A de l'antenne de réception, en considérant différents angles d'incidence permet de mettre en évidence d'éventuels phénomènes physiques engendrés par le diagramme de rayonnement de l'antenne ainsi que par la dimension variable de la largeur de la première zone de Fresnel projetée sur la surface du matériau.

5. Conclusion

L'utilisation de ces deux interfaces constitue un complément pédagogique innovant pour l'approche académique de l'enseignement des micro-ondes : elle permet de confronter l'étudiant au choix de méthodes et de conditions expérimentales optimales, le dispensant par ailleurs d'une fastidieuse manipulation informatique des données. La possibilité de comparer, à chaque étape, les valeurs mesurées aux valeurs théoriques, permet enfin d'entretenir le questionnement sur la signification physique des résultats.

Références

[1] C.A. Balanis, *Antenna theory*, John Wiley, Second Edition (1997)

[2] R.M.A. Azzam and N.M. Bashara, *Ellipsometry and polarized light*, Elsevier, (1999)

[3] M. Born, E. Wolf, *Principles of Optics*, Pergamon, Sixth Edition, New York (1980)

[4] F. Sagnard, C. Vignat, V. Moncourtois, E. Rolland, *Microwave measurements of the complex permittivity of construction materials using Fresnel reflection coefficients and reflection ellipsometry*, IEEE Antennas and Propagation Symposium (AP-S), Boston (USA), (8-13 July 2001)

[5] F. Sagnard, F. Bentabet, C. Vignat, *Theoretical study of a new method based on ellipsometry for the measurement of the complex permittivity of materials*, Electronics Letters, vol 36, n. 22 (2000)