



**HAL**  
open science

## **Modèle SIBC pour la simulation FDTD d'une cible recouverte de métamatériaux**

S Gaucher, Alain Reineix, Christophe Guiffaut, O Cessenat

### ► To cite this version:

S Gaucher, Alain Reineix, Christophe Guiffaut, O Cessenat. Modèle SIBC pour la simulation FDTD d'une cible recouverte de métamatériaux. Journées Nationales de Microondes (JNM) 2022, Jun 2022, Limoges, France. <hal-03773201>

**HAL Id: hal-03773201**

**<https://unilim.hal.science/hal-03773201v1>**

Submitted on 9 Sep 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

## Modèle SIBC pour la simulation FDTD d'une cible recouverte de métamatériaux

S. Gaucher<sup>1,2</sup>, C. Guiffaut<sup>2</sup>, A. Reineix<sup>2</sup>, O. Cessenat<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CEA CESTA, 15 avenue des Sablières, 33114

<sup>2</sup>Laboratoire XLIM, 123 avenue Albert Thomas, 87060  
samuel.gaucher@xlim.fr

**Résumé** — Pour contrôler la diffraction d'une cible éclairée par une onde radar, une technique est d'utiliser des métamatériaux avec des propriétés d'absorption ou de redirection du champ. Leur prise en compte dans les outils de simulation peut s'avérer complexe surtout lorsqu'ils sont appliqués sous forme de couches minces hétérogènes à la surface de la cible. Ceci peut être réalisé en déterminant d'abord un modèle d'impédance de surface dépendant de l'angle d'incidence, qui est ensuite implémenté dans un solveur 3D FDTD.

### 1. Introduction

Dans cet article, un modèle de type impédance de surface (SIBC) de métamatériau périodique est incorporé sur la surface d'une cible qui est modélisée dans un code FDTD. D'une part, le modèle permet d'éviter de mailler une géométrie complexe couvrant certaines parties de la cible. D'autre part, le pas spatial peut être augmenté. En effet, ce dernier est censé être assez petit pour capturer les variations des champs à l'intérieur de la fine couche de métamatériaux. Comme cette dernière est remplacée par un modèle SIBC, le pas spatial choisi peut être plus grand car il n'est plus régi par la faible épaisseur de la couche. Par conséquent, le nombre de mailles du volume de calcul est réduit de  $\alpha^3$  et la durée de temps de calcul par  $\alpha^4$  où  $\alpha$  est le facteur de relâchement du maillage.

L'objectif visé étant de calculer la surface équivalente radar (SER) de structures de grandes dimensions sur de larges bandes de fréquences, la méthode des différences finies dans le domaine temporel (FDTD) convient bien pour résoudre les équations de Maxwell. D'abord, le métamatériau est caractérisé sur une période spatiale pour en faire une représentation sous la forme d'un modèle SIBC. Pour ce faire, les impédances de surface du métamatériau sont calculées par la méthode Spectral FDTD/TD-VFz (SFDTD/TD-VFz) [1] [6] pour tous les angles d'incidence en appliquant des conditions aux limites périodiques de Floquet (PBC) autour du motif élémentaire du métamatériau. Dans un second temps, le modèle SIBC est décomposé par la technique vector fitting (VF) [2] puis introduit comme condition aux limites de Leontovich sur la peau de la cible à étudier. Cette approche permet un calcul simple et efficace du champ électrique tangentiel à la sur-

face du métamatériau et évite le traitement d'un produit de convolution dans le domaine temporel. En outre, les composantes tangentielles du champ électrique sont calculées au centre des facettes des cellules FDTD contenant la paroi SIBC [3] [4] ce qui permet de lever l'ambiguïté de l'application de la relation de Leontovitch sur des marches d'escalier. Les calculs des modèles numériques présentés dans ce papier sont effectués par le solveur Temsi-fd [5] développé au sein de l'institut Xlim.

### 2. Calcul SFDTD des impédances de surface

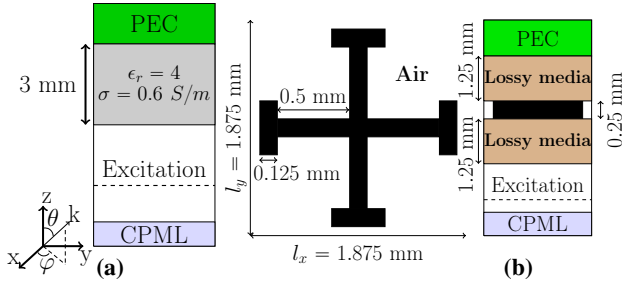
Les deux motifs élémentaires arbitraires (et non absorbants) de la figure 1 sont illuminés par une onde plane incidente de type Gaussienne qui se propage dans la direction  $+z$ . Des PBC sont mises en place dans les directions  $(x, y)$ . Le premier élément est simplement une couche diélectrique homogène  $\epsilon_r = 4$  avec une conductivité  $\sigma = 0.6$ . Le deuxième motif est plus élaboré et consiste en une croix de Jérusalem parfaitement conductrice (PEC) entourée de part et d'autre par une couche diélectrique  $\epsilon_r = \text{Diag}(20.2, 10.1, 10.5)$  avec pertes  $\sigma = \text{Diag}(5, 3, 1)$ . En outre, comme l'idée générale de la méthodologie consiste à recouvrir une cible fortement conductrice de métamatériaux, les deux motifs reposent sur une plaque PEC afin de prévenir la transmission des ondes électromagnétiques. Les impédances de surface ont été calculées analytiquement pour le motif A et par le schéma SFDTD/TD-VFz pour le motif B, cela pour tous les angles d'incidence et pour les polarisations TE et TM. Autrement dit, pour chaque angle d'incidence, nous avons étudié le rapport

$$Z_\varphi = -\frac{E_\varphi}{H_\rho} \text{ (mode TE)}, Z_\rho = \frac{E_\rho}{H_\varphi} \text{ (mode TM)}, \quad (1)$$

évalué dans l'air à une demi-cellule de l'interface air|matériau ce qui reste une distance très petite devant la longueur d'onde et qui n'a donc pas d'impact notable sur l'impédance. Ici,  $Z$  est l'impédance de surface et  $(\rho, \varphi)$  désigne les axes du repère cylindrique. Les impédances (1) sont ensuite décomposées par VF

$$Z(\omega) = r_0 + \sum_{n=1}^N \frac{k_n}{j\omega - \omega_n}, \quad (2)$$

où  $r_0$  est la résistance,  $k_n$  les résidus et  $\omega_n$  les pôles. Les figures 2-5 illustrent quelques impédances fittées par VF

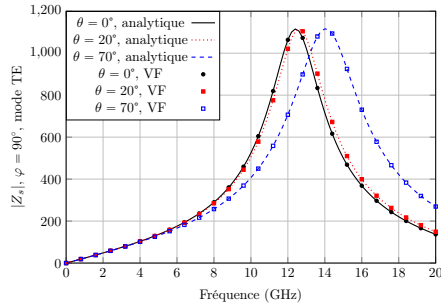


**FIGURE 1. Géométrie des motifs. (a) Motif A, plan  $yOz$  (b) Motif B. Plan  $xOy$  (gauche), plan  $yOz$  (droite).**

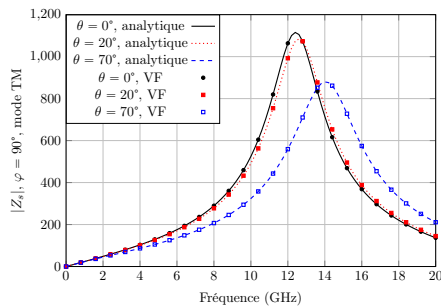
en modes TE et TM. Pour le motif A, on remarque un décalage en fréquence au fur et à mesure que l'angle d'incidence augmente et ce pour les deux modes et on remarque aussi une baisse d'amplitude pour le mode TM. L'impédance du motif B est peu sensible à l'angle d'incidence. En outre, la polarisation de l'onde plane à une forte influence sur la réponse spectrale.

### 3. Implémentation du modèle dans la FDTD

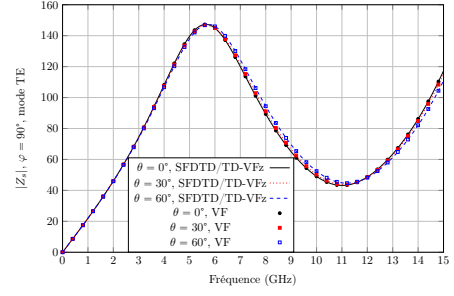
Le but est de prédire la SER d'une cible recouverte de métamatériaux avec la méthode FDTD. La couche hétérogène est remplacée par une condition aux limites SIBC faisant intervenir les impédances de surface calculées dans la section 2. Soit  $k$  le vecteur unitaire suivant l'axe d'incidence. Pour chaque facette de cellule qui est un métamatériau (paroi SIBC), on identifie le repère local  $(u, v, n)$  où  $n$  est le vecteur unitaire sortant normal et  $(u, v)$  sont les vecteurs unitaires tangents au métamatériau. Dès lors, les angles locaux d'élévation  $\theta_n$  et d'azimut  $\varphi_{u,v}$  définis sur



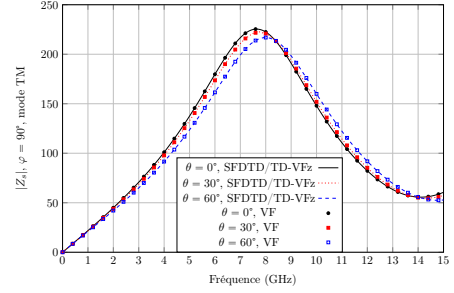
**FIGURE 2. Impédances du motif A en mode TE.**



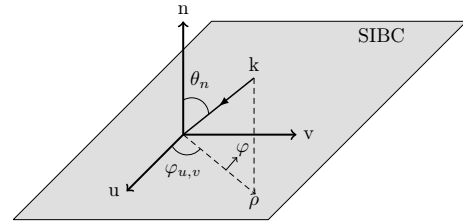
**FIGURE 3. Impédances du motif A en mode TM.**



**FIGURE 4. Impédances du motif B en mode TE.**



**FIGURE 5. Impédances du motif B en mode TM.**



**FIGURE 6. Repère local sur une facette de cellule FDTD qui est une paroi SIBC.**

la figure 6 sont calculés

$$\theta_n = \arccos k_n, \quad (3a)$$

$$\varphi_{u,v} = \arctan \frac{k_v}{k_u}, \quad (3b)$$

où  $(k_u, k_v, k_n)$  sont les composantes du vecteur  $k$  dans le repère local. Les composantes de champ électrique dans le repère cylindrique  $(\rho, \varphi)$  se déduisent en appliquant la condition limite de Leontovich

$$\begin{bmatrix} E_\rho \\ E_\varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -Z_\rho(\omega, \theta_n, \varphi_{u,v}) \\ Z_\varphi(\omega, \theta_n, \varphi_{u,v}) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_\rho \\ H_\varphi \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Notons que les impédances de surface du métamatériau  $Z_\rho$  et  $Z_\varphi$  dans (4) sont connues car elles ont été préalablement calculées par la méthode SFDTD/TD-VFz dans la section 2. Soit  $\mathcal{M}$  la matrice de passage entre la base cylindrique et la base locale. Les composantes électriques locales  $(E_u, E_v)$  s'écrivent alors

$$\begin{bmatrix} E_u \\ E_v \end{bmatrix} = \mathcal{M}^{-1}(\varphi_{u,v}) \begin{bmatrix} 0 & -Z_\rho \\ Z_\varphi & 0 \end{bmatrix} \mathcal{M}(\varphi_{u,v}) \begin{bmatrix} H_u \\ H_v \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Pour des parois dans le plan cartésien, par exemple  $xOy$ , nous avons :  $(u, v, n) = (x, y, z)$ . Le traitement de (5) est réalisé pour des composantes tangentielles calculées au centre des facettes de cellule qui sont des parois SIBC [3] [4].

#### 4. Résultats numériques

Considérons maintenant un cube PEC recouvert de motifs A ou B sur certaines de ses faces (voir figure 7). Le but est de comparer le modèle SIBC (les motifs sont remplacés par la condition aux limites SIBC) avec le schéma FDTD de Yee de référence (les motifs sont maillés), et le cas où le cube est juste un PEC sans motif, ceci afin de noter l'effet du matériau. Le cube est simulé sur 4 ns avec une condition CFL=0.99.

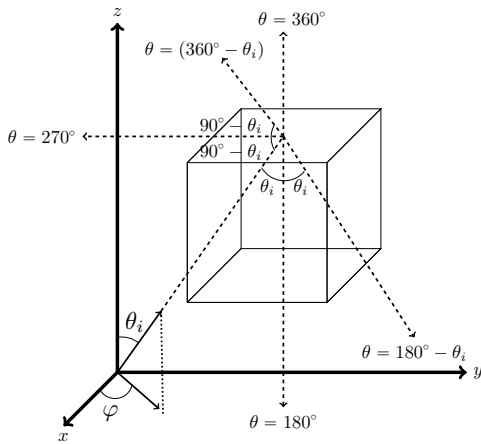


FIGURE 7. Géométrie du cube PEC. L'évaluation de la SER dans le plan  $yOz$  ( $\varphi = 90^\circ$ ) est représentée par les lignes pointillées.

**Motif A :** Le cube PEC fait  $L = 8$  cm de côtés. Il est recouvert du motif A sur ses deux faces  $xOy$  inf et  $xOz$  inf. Le pas spatial est uniforme  $\Delta = 0.5$  mm. Le cube est illuminé par un angle d'incidence ( $\theta_i = 20^\circ, \varphi = 90^\circ$ ). Les deux faces recouvertes de motifs sont en visibilité directe des rayons incidents. De (3), nous déduisons l'angle d'élévation local  $\theta_n = 20^\circ$  du repère local  $(x, y, -z)$  de la face  $xOy$  inf du cube et  $\theta_n = 70^\circ$  du repère local  $(z, x, -y)$  pour la face  $xOz$  inf. Ceci se vérifie géométriquement sur la figure 7. La SER est calculée dans la direction  $\theta = 340^\circ$  c.-à-d. dans la direction de réflexion de la face  $xOz$  inf du cube. La figure 8 montre la bonne corrélation entre le modèle SIBC et le schéma FDTD standard pour le mode TE. En outre, la SER a aussi été calculée par un modèle SIBC qui prend mal en compte l'orientation de l'onde incidente (courbe en pointillés verts) avec un angle d'élévation local fixé à  $\theta_n = 0^\circ$  pour les faces recouvertes de motifs. Par conséquent, on distingue un décalage en fréquence comparé au modèle de référence ce qui montre l'intérêt de considérer un modèle SIBC qui dépend de l'angle d'incidence. Ce dernier résultat était attendu en vertu des figures 2 et 3 montrant une impédance sensible à l'angle

d'élévation.

**Motif B :** Le cube métallique fait  $L = 37.5$  mm de côtés. Il est recouvert d'un patch de  $20 \times 20$  motifs B sur ses trois faces  $xOy$  inf,  $xOz$  inf et  $yOz$  inf. Les trois faces recouvertes de motifs sont en visibilité directe des rayons incidents ( $\theta_i = 60^\circ, \varphi = 30^\circ$ ). La SER est calculée en mode TM dans le plan d'incidence  $\rho Oz$  c.-à-d. dans les directions ( $\theta \in [0, 360^\circ], \varphi = 30^\circ$ ). Le pas spatial est uniforme  $\Delta = 0.125$  mm pour le modèle PEC et le modèle FDTD standard (le cube PEC fait donc 300 cellules de côtés). En revanche, un déraffinement spatial uniforme environ trois fois plus grand  $\Delta = 0.4025$  mm est appliqué pour le modèle SIBC. La contrainte CFL est donc relâchée et la taille du domaine est considérablement réduite. A propos des itérations temporelles, le temps de calcul est de 12060 s pour le modèle FDTD standard et de 1770 s pour le modèle SIBC. L'occupation mémoire est de 9.7 Go pour le modèle FDTD et de 511 Mo pour le modèle SIBC. Les calculs ont été opérés en double précision sur le calculateur de l'université de Limoges CALI [7] avec 8 processeurs. Les figures 9-11 montrent respectivement la cartographie SER obtenue par le modèle FDTD standard, SIBC et PEC sur la bande de fréquence  $0^+ - 15$  GHz. La figure 13 correspond au cas de la fréquence  $f = 5$  GHz. La figure 12 illustre l'erreur relative (différence en dB de la SER du modèle FDTD avec la SER du modèle SIBC). On remarque que le modèle SIBC est très proche du schéma FDTD.

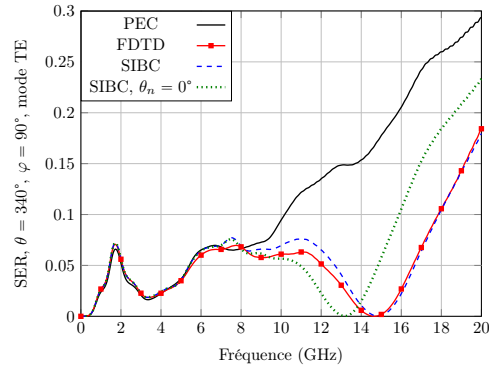


FIGURE 8. SER ( $m^2$ ) obtenue par le modèle SIBC et le schéma FDTD classique pour le motif A.

#### 5. Discussion

Précédemment, la couche de matériau était toujours en visibilité directe des rayons incidents ( $k.n < 0$ ). En revanche, le modèle proposé ne s'établit pas dans les zones d'ombre ( $k.n > 0$ ). Néanmoins, une cible volante furtive serait a priori recouverte de métamatériaux que dans les parties en visibilité direct avec le RADAR (typiquement le devant et le dessous de la cible). Toutefois, si un matériau situé dans une zone d'ombre intervient dans la réponse spectrale, cela serait la conséquence d'ondes rampantes le longeant. Ainsi, le matériau sera traité par un modèle SIBC réglé sur une incidence  $\theta_n$  rasante.

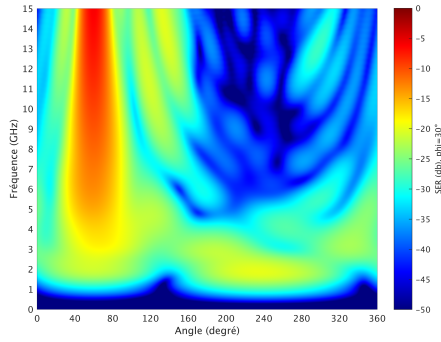


FIGURE 9. SER (dB) obtenue par le modèle FDTD.

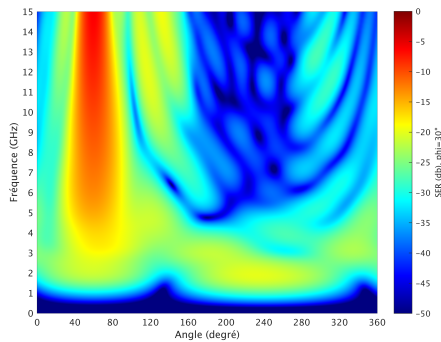


FIGURE 10. SER (dB) obtenue par le modèle SIBC.

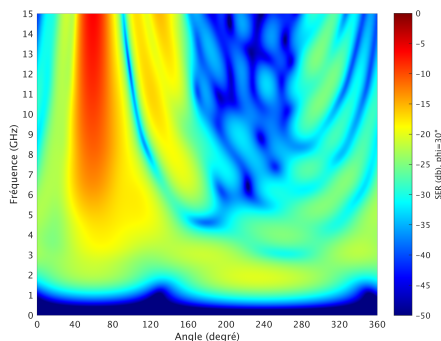


FIGURE 11. SER (dB) obtenue par le modèle PEC.

## 6. Conclusion

Nous avons présenté un modèle d'impédance de surface pour modéliser une cible recouverte de métamatériaux. Le modèle tient compte de l'angle d'incidence et de la polarisation de l'onde plane incidente. En outre, le modèle s'applique pour des parois dans le plan cartésien. Les travaux futurs consistent à adapter ce modèle dans la méthode FDTD conforme pour représenter plus fidèlement les géométries courbes de la cible.

## Références

[1] A. Aminian and Y. Rahmat-Samii, "Spectral FDTD : A novel technique for the analysis of oblique inci-

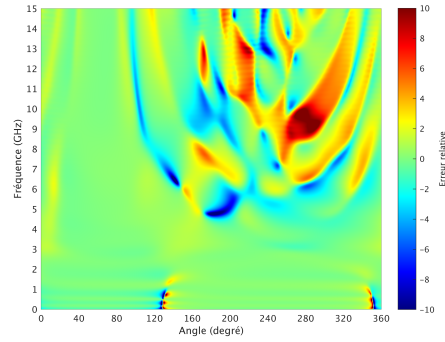


FIGURE 12. Erreur relative entre le schéma FDTD et le modèle SIBC.

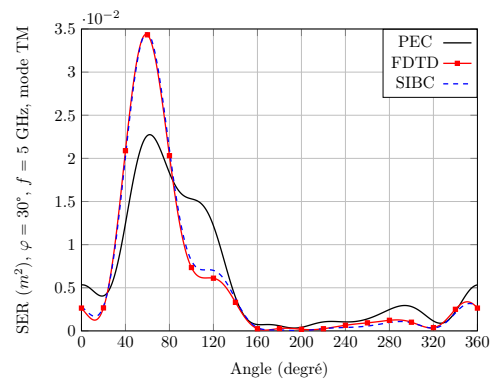


FIGURE 13. SER ( $m^2$ ) obtenue par le schéma FDTD standard, le modèle SIBC et le modèle PEC à la fréquence  $f = 5$  GHz et mode TM.

dent plane wave on periodic structures," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 54, no. 6, pp. 1818–1825, 2006.

- [2] B. Gustavsen and A. Semlyen, "Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting," *IEEE Transactions on power delivery*, vol. 14, no. 3, pp. 1052–1061, 1999.
- [3] C. Guiffaut *et al.*, "Modèles de parois conductrices dans la méthode fdttd appliquées à la problématique CEM aéronautique," in *17ème Colloque International et Exposition sur la Compatibilité Electromagnétique*, Clermont-Ferrand, France, 30/06-03/07, 2014.
- [4] I. D. Flintoft *et al.*, "Face-centered anisotropic surface impedance boundary conditions in FDTD," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 66, no. 2, pp. 643–650, 2017.
- [5] *Time ElectroMagnetic Simulator-Finite Difference Software, TEMSI-FD*, CNRS, Univ. Limoges, Limoges, France, 2006.
- [6] S. Gaucher *et al.*, "Hybrid spectral FDTD/TD-VFz method for analysis of periodic absorbers," in *2021 IEEE Conference on Antenna Measurements Applications (CAMA)*, 2021, pp. 190–193.
- [7] *Supercalculateur de l'université de Limoges, CNRS, Univ. Limoges, France*, <http://cali-doc.unilim.fr/>.