

Pseudo-adaptation d'impédance pour la diffraction d'objets construits à l'aide de briques magnétodiélectriques

T. DEKNUYDT - M. MOGNOT - O. VACUS / CEA – Cesta
R. W. ZIOLKOWSKI / Université de l'Arizona, États-Unis

Tant en régime micro-ondes que dans le domaine de l'optique ou de l'infrarouge, l'engouement suscité par les métamatériaux a ravivé la délicate question de l'homogénéisation des paramètres constitutifs en électromagnétisme. Une approche numérique de grande précision est proposée pour étudier la diffraction par des objets 3D fortement hétérogènes, sous des hypothèses mettant en défaut les règles usuelles de détermination de paramètres équivalents. Outre des résultats intéressants d'annulation de surface équivalent radar (SER), cette approche constitue un puissant outil d'analyse permettant en particulier de statuer sur le caractère « homogénéisable » ou non d'un milieu quelconque.

Le terme métamatériaux peut désigner une multitude de configurations différentes [1], mais dans lesquelles des inclusions petites devant la longueur d'onde confèrent toujours au milieu une permittivité diélectrique ϵ et/ou une perméabilité magnétique μ macroscopique(s) équivalente(s) nouvelle(s). Ces propriétés équivalentes, dites paramètres effectifs, sont souvent dérivées de modèles non physiques: taille de l'inclusion tendant vers zéro, ou milieu périodique infini par exemple. De surcroît, des restrictions apparaissent sur le taux de dilution ou le contraste entre matériaux, qui doivent rester limités. Pour dépasser ces limites, l'idée a été de mettre en œuvre le théorème de Weston [2]. Ce théorème stipule que le champ électromagnétique diffracté par un objet présentant des symétries d'une part, et tel que $\epsilon = \mu$ d'autre part, se caractérise par:

- une annulation stricte le long des axes de symétrie (d'ordre supérieur ou égal à 3);
- une égalité stricte des composantes de champ suivant les polarisations principales.

Une famille d'objets convexes ou concaves dérivés du cube régulier, respectant les symétries d'ordre 4 (axes passant par les centres des faces opposées) et d'ordre 3 (axes passant par les coins opposés) a été définie [3]. Des maillages de ces objets (figure 1) ont été réalisés pour le code Arlene [4], permettant la modélisation de cas homogènes (un matériau) ou hétérogènes (deux matériaux ou plus). L'avantage de cette approche est sa très grande précision: basés sur la méthode des équations intégrales, les calculs sont suffisamment fiables pour évaluer des SER pouvant varier sur cinq ou six ordres de grandeur. Des tests avec maillage raffiné (pas d'espace divisé par deux,



Figure 1. Maillages de formes quelconques dérivées du cube, les couleurs rouge et bleu montrent l'alternance de blocs élémentaires de deux matériaux pouvant être choisis arbitrairement différents. Les axes de symétries d'ordre 3 et 4 sont toujours conservés.

d'où un nombre de degrés de liberté multiplié par 4) permettent de s'en assurer.

Grâce à cet outil et à la puissance de calcul de la machine TERA 100, la diffraction des ondes électromagnétiques a été étudiée sous les hypothèses du théorème de Weston, puis au-delà de ces hypothèses. En effet, les matériaux tels que $\epsilon = \mu$ n'existent pas dans la nature; aussi, des associations de matériaux susceptibles de respecter cette égalité, non pas strictement mais en moyenne seulement, ont-elles été proposées. L'objectif peut être de chercher le meilleur complément possible à un matériau donné, ou même de travailler avec un matériau non magnétique ($\mu = 1$). Les courbes de la figure 2 montrent bien qu'une physique proche de celle du cas idéal peut être obtenue avec des matériaux plus réalistes.

Pour quantifier l'efficacité des différentes associations testées, deux critères ont enfin été établis, l'un portant sur l'annulation de SER (critère C1), l'autre sur l'égalité des polarisations (critère C2).

Ils permettent de statuer objectivement sur les niveaux relatifs de SER obtenus par calcul. En effet, ils prennent dans le cas homogène idéal $\varepsilon = \mu$ des valeurs de l'ordre de -20 dB pour une perturbation de ε ou de μ de 1 % seulement. Dans le cas hétérogène, toutes les valeurs inférieures à ce seuil de -20 dB fournissent donc la preuve d'un équilibre quasi parfait. Des études paramétriques sont alors possibles (figure 3), soit en fonction de la fréquence pour déterminer la taille des cellules élémentaires compatibles d'une homogénéisation, soit en fonction des paramètres constitutifs. Une valeur possible de paramètre équivalent peut ainsi être déterminée par calcul, fournissant un résultat précieux quand les règles usuelles ne s'appliquent plus. Grâce à ces premiers résultats et à la référence qu'ils constituent, l'étude peut être étendue à de plus larges bandes de fréquence et des distributions de matériaux moins figées, en particulier en ayant recours au code 3D Sophie du CEA – Cesta (méthode FDTD, pour Finite Difference Time Domain) [5].

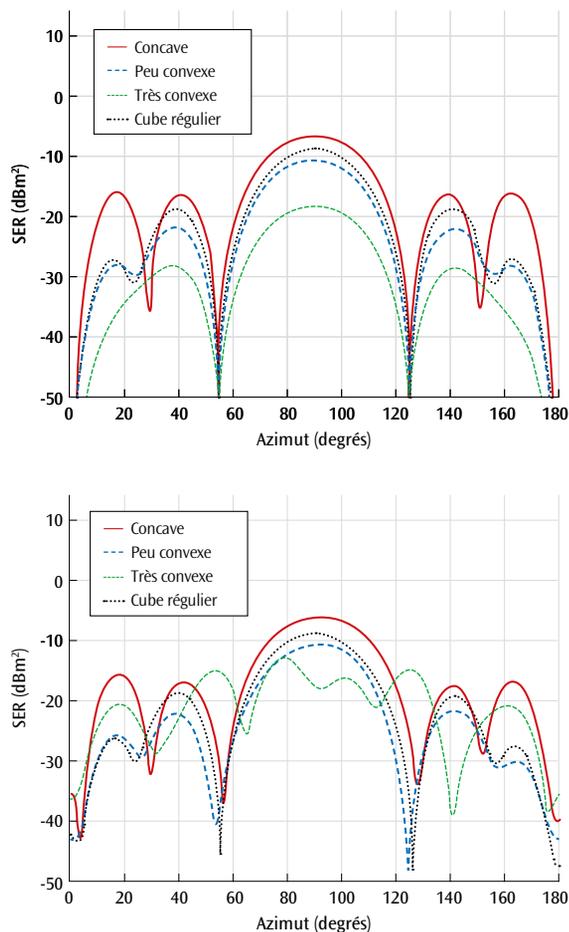


Figure 2. Courbes de surface équivalent radar (SER) pour un cube régulier et les 3 géométries représentées sur la figure 1 (axes des faces à 0° et 180°, axes des coins à 54,7° et 125,3°). En haut, pour des objets homogènes, les annulations de SER attendues sont bien observées le long des axes de symétrie; en bas, avec des objets hétérogènes, ces annulations sont plus ou moins préservées selon les cas.

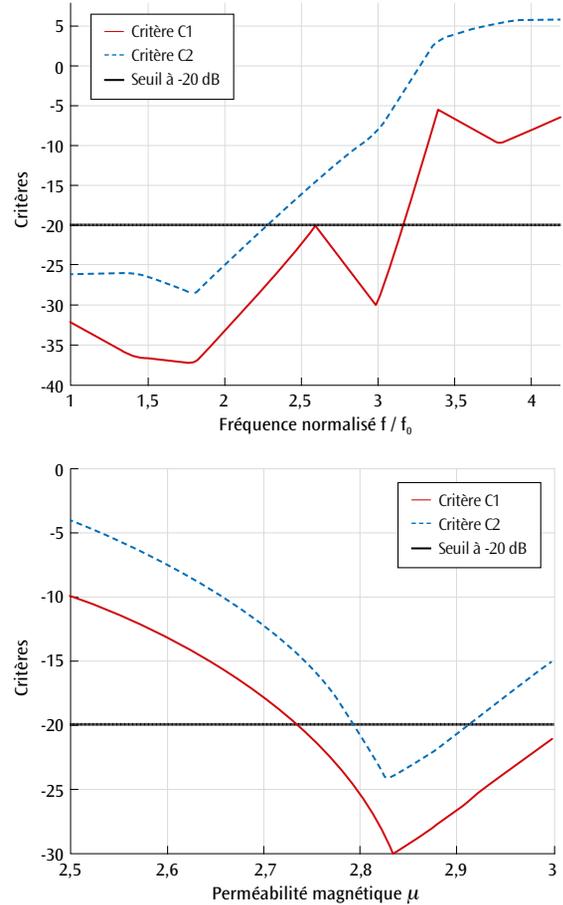


Figure 3. Évolution des critères de performances C1 (annulation de surface équivalent radar) et C2 (égalité des polarisations) pour un mélange de deux diélectriques ε_1 et ε_2 . En haut, en fonction de la fréquence normalisée à la fréquence f_0 (telle que la longueur d'onde est égale à l'arête du cube) : en dessous de -20 dB, l'objet est homogénéisable. En bas, en fonction d'une perméabilité magnétique artificielle: le minimum est atteint pour $\mu = \varepsilon_{eff}$, la permittivité effective du milieu.

Références

- [1] N. ENGHETA, R. W. ZIOLKOWSKI, *Metamaterials: Physics and engineering explorations*, John Wiley & Sons, New York (2006).
- [2] V. H. WESTON, "Theory of absorbers in scattering", *IEEE Trans. AP*, **11**, p. 578-584 (1963).
- [3] O. VACUS, R. W. ZIOLKOWSKI, "Roughly impedance-matched scatterers constructed with magnetodielectric cells", *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, **63**, p. 4418-4425 (2015).
- [4] C. AUGONNET *et al.*, "Accelerating a massively parallel numerical simulation in electromagnetism using a cluster of GPUs", *Proc. of the 10th international conference of Parallel Processing and Applied Mathematics (PPAM 2013)*, Varsovie, Pologne, 8-11 septembre 2013, R. Wyrzykowski, J. Dongarra, K. Karczewski, J. Wasniewski (Eds), Springer Berlin Heidelberg, **8384**, p. 593-602 (2013).
- [5] O. CESSENAT, «Sophie, un code de calcul haute performance pour la propagation des ondes et particules chargées», *Chocs*, **44**, p. 25-32 (2013).