

Les métamatériaux : une solution pour l'ingénierie d'indice complexe

REDHA ABDEDDAIM¹, ABDELWAHEB OURIR²,
JEAN-MICHEL GEFFRIN¹, JULIEN DE ROSNY²,
GÉRARD TAYEB¹
AIX MARSEILLE UNIVERSITÉ, CNRS, CENTRALE
MARSEILLE, INSTITUT FRESNEL, UMR 7249,
MARSEILLE¹, INSTITUT LANGEVIN, CNRS, ESPCI²

Introduction

L'apparition des métamatériaux au début des années 2000 [1] a ouvert de nouvelles perspectives dans le domaine des interactions ondes électromagnétiques – matière. Ils ont permis, en prenant comme base de départ des structures simples, de réaliser des fonctions électromagnétiques complexes dans le domaine des micro-ondes [2] et puis plus récemment dans le domaine optique [3]. Ces fonctions sont réalisées grâce à un contrôle fin de l'indice complexe. Effectivement, ces structures présentent, sous certaines conditions d'arrangement et de polarisation, une plage de variation remarquable en termes d'indice de réfraction. L'ingénierie de cet indice peut être réalisée à partir de différentes méthodes de structuration et de construction. Elle utilise les concepts d'homogénéisation, de résonance de Mie [4], de modes piégés [5], de modes hybridés [6], ainsi que ceux de la théorie du couplage. Dans cet article, nous illustrons quelques techniques permettant d'obtenir des valeurs particulières de perméabilité, de permittivité et d'indice.

La première structure étudiée permet de réaliser des milieux anisotropes dont la permittivité est négative selon un de ses axes [7]. Nous étudions ensuite le cas des résonateurs métalliques qui permettent d'obtenir une perméabilité négative [8]. Ensuite, nous

nous intéressons aux réseaux de structures hybridées [9] qui permettent d'obtenir un indice négatif sans avoir recours à des résonateurs magnétiques. Enfin, nous abordons le cas des résonateurs diélectriques qui permettent aussi l'obtention d'indices complexes en utilisant les différentes interactions et couplages entre les modes propres électriques et magnétiques excitable dans ces structures [10].

Ingénierie de la permittivité

Une des méthodes les plus simples pour réaliser des milieux de permittivité complexe est indéniablement la méthode des réseaux de tiges métalliques orientées parallèlement à la direction du champ électrique. Le point fort de cette technique vient du fait que la valeur de la permittivité dépend essentiellement du réseau [7]. Lorsque la période du réseau est faible devant la longueur d'onde, la permittivité effective est obtenue à partir de la période du réseau (d) et du rayon des fils (r) comme le montre l'équation (1).

$$\varepsilon = 1 - \frac{\lambda^2}{\lambda_c^2}, \text{ avec } \lambda_c^2 = 2\pi d^2 \ln\left(\frac{d}{2r}\right) \quad (1)$$

La figure 1 montre la comparaison entre les réponses simulées d'un réseau de tiges infiniment conductrices ($r = 0,01$, $d = 1$, $\lambda_c = 5$, $\lambda = 10$) et une tige homogène de rayon 3,63 et d'indice imaginaire pur $1,35 i$. On voit qu'il y a un très bon accord entre les deux cartes de champs représentées ci-après. Il est donc évident qu'à l'aide d'une structure très simple, il est possible de mimer le comportement d'un milieu homogène de permittivité négative. Un des inconvénients de ces structures est que la dimension des tiges métalliques doit être grande devant la longueur d'onde dans la direction du champ électrique.

ABSTRACT

In this article, we demonstrate the interest of using metamaterials in the index engineering domain. We show that using these structures makes it possible to mimic the behavior of homogeneous media with given permittivity, permeability and refraction index values, realizing a macroscopic structuration of simple elementary patterns. The metamaterials are therefore an attractive alternative to the microscopic structuration of matter.

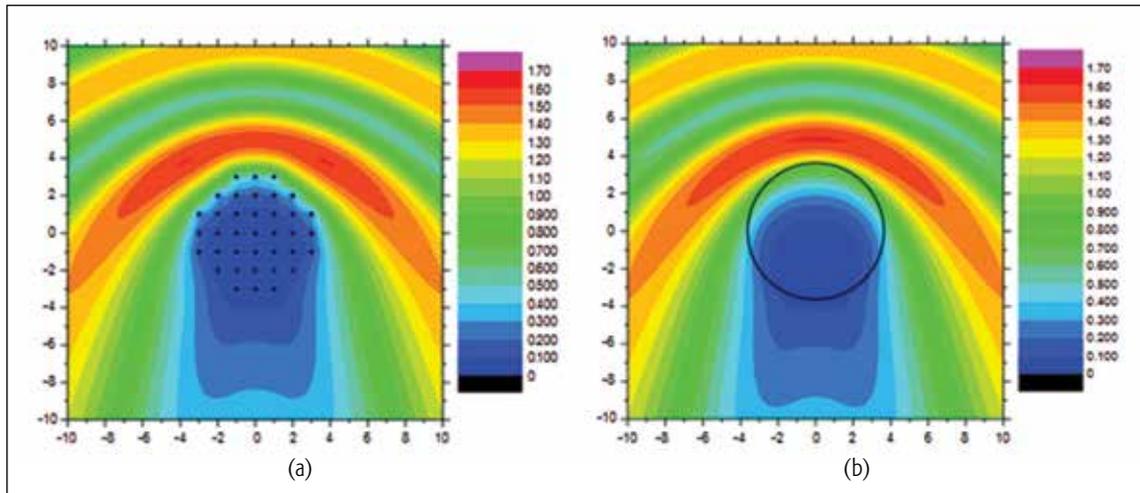


Figure 1 : Comparaison entre la réponse d'un réseau de tiges et d'un milieu homogène - (a) : carte de champ d'un réseau de tiges - b : milieu équivalent) [11].

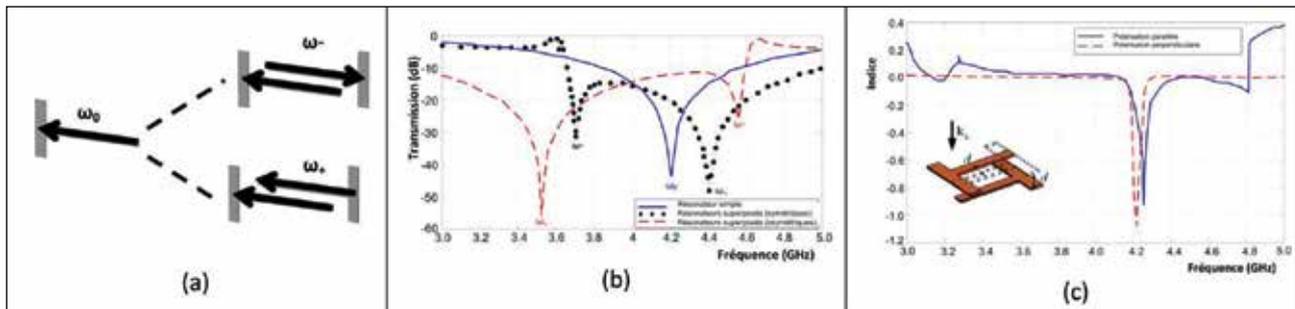


Figure 2 : Milieu isotrope à indice négatif par hybridation de modes (a : modèle d'hybridation - b : courbes de transmissions avec trois types de résonateurs - c : indice négatif selon deux types de polarisation) [13].

Ingénierie de la perméabilité

L'ingénierie de la perméabilité peut être faite de la même façon que dans le cas des réseaux de fils. Dans ce cas, on remplace les tiges métalliques par des résonateurs à anneaux fendus imbriqués l'un dans l'autre avec un champ magnétique qui leur est normal. La perméabilité s'exprime dans ce cas de la façon suivante [8] :

$$\mu = 1 - \frac{\pi r^2 / a^2}{1 + 2i\rho / \omega r \mu_0 - 3dc^2 / \pi^2 \omega^2 r^3} \quad (2)$$

c et r sont respectivement l'épaisseur et le rayon de l'anneau et a est le pas du réseau. L'utilisation de ce genre de structures est limitée au domaine micro-onde. Cette limite est due essentiellement à la vitesse des électrons qui devient finie dans le domaine optique. Une alternative pour atteindre des fréquences plus élevées est l'utilisation des milieux chiraux en forme de spire par exemple [12].

Ingénierie de l'indice

L'ingénierie de l'indice complexe nécessite d'agir simultanément sur les deux réseaux cités ci-dessus. Une solution plus simple à mettre en place est de basculer sur des struc-

tures couplées dites à modes hybridés [6]. Effectivement, si on superpose deux résonateurs électriques dans la direction de propagation, le mode électrique fondamental (ω_0) d'un résonateur seul donne naissance à deux nouveaux modes : un mode électrique (ω_+) et un mode magnétique (ω_-) comme le montre le sens des courants sur la figure 2a et la réponse fréquentielle sur la figure 2b. Avec cette méthode, il devient facile d'agir sur ces deux modes simultanément en ajustant d'une part la dimension du résonateur pour travailler sur la permittivité et d'autre part la distance de couplage pour agir sur la perméabilité. Cette technique nous offre un degré de liberté supplémentaire qui est la symétrie. Effectivement, si on agit sur la symétrie du réseau, il est possible de changer la position fréquentielle des modes (figure 2b), de les coupler et ainsi d'obtenir un indice complexe donné. La figure 2c montre un exemple de réalisation d'un milieu isotrope à indice négatif [13] conçu avec cette méthode.

Bien qu'avantageuse cette méthode peut être difficile à mettre en place pour réaliser des structures fonctionnant à de faibles longueurs d'onde. Effectivement, comme le couplage de modes se fait à partir de brisure de symétrie, des problèmes de précision d'alignement peuvent vite se poser.

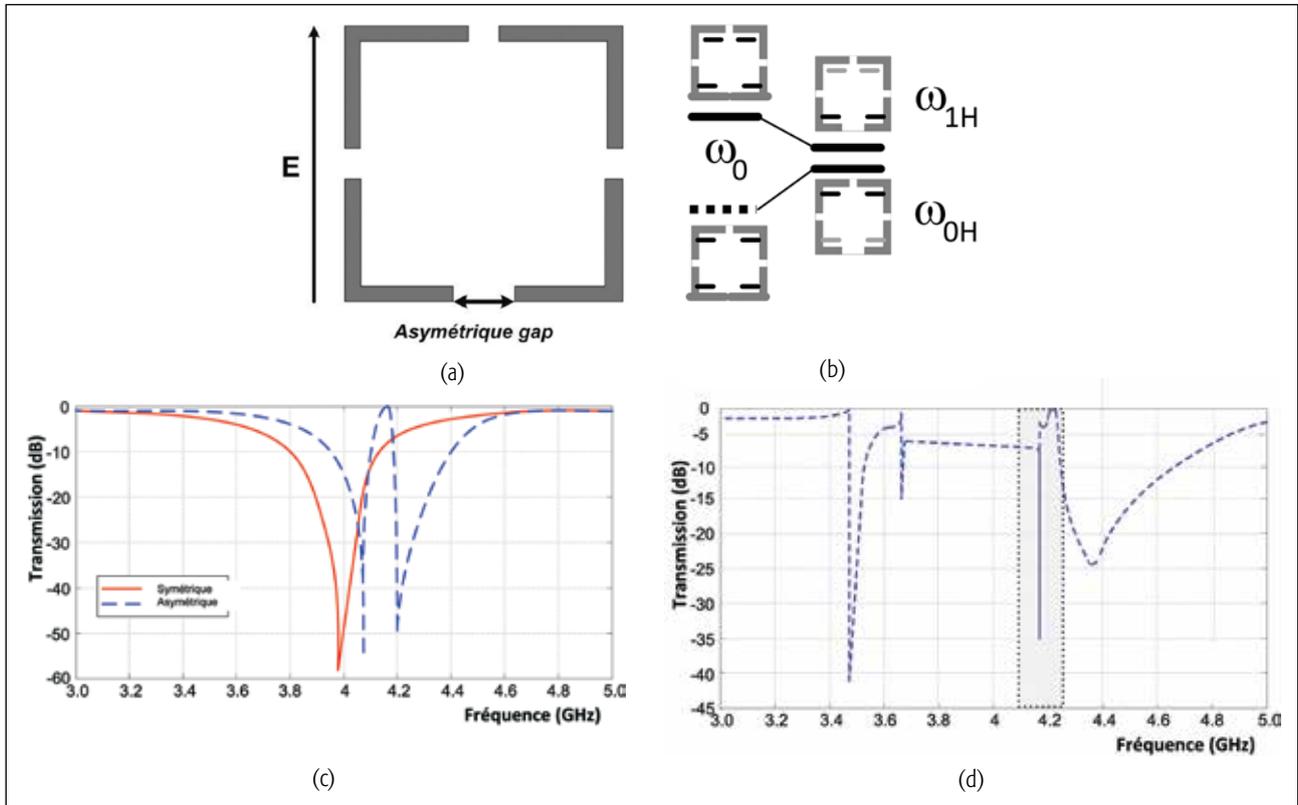


Figure 3 : Milieu d'indice négatif obtenu par hybridation de modes piégés (a : schéma de principe - b : modes du résonateur c : courbe de transmission (symétrique et asymétrique) - d : courbe de transmission du réseau hybridé).

Une alternative à la brisure de symétrie du réseau est la brisure de symétrie du résonateur lui-même. Cette opération a deux avantages, le premier étant un gain de place et de simplicité et le second étant l'excitation de modes supplémentaires dits piégés, ce qui permet d'avoir un nombre plus important de modes et ainsi un plus grand nombre de possibilités d'indices complexes. Si on part d'un résonateur électrique à quatre gaps, et que l'on crée une dissymétrie en variant la taille de l'un des gaps (figure 3a), on arrive à faire exister deux modes, le premier étant le fondamental (ω_{0H}) et le second étant un mode piégé (ω_{1H}). On se retrouve donc avec deux modes électriques au lieu d'un (figures 3b & c). Ensuite, il suffit d'hybrider ce résonateur (de le coupler à un autre résonateur dans la direction de propagation) et on arrive à faire que deux modes (un électrique et un magnétique) se combinent entre eux. Avec cette méthode, on arrive à réaliser un milieu d'indice négatif (figure 3d) sans briser la symétrie du réseau [9].

Résonateur diélectrique

Toutes les structures que nous avons utilisées précédemment sont métalliques ce qui limite leur utilisation dans le domaine optique, domaine dans lequel on ne peut pas négliger les pertes dans les métaux. Une méthode pour lever cet

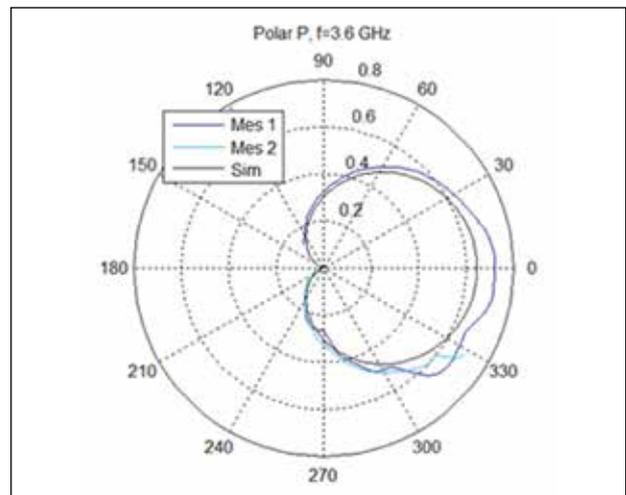


Figure 4 : Mesures et simulation du diagramme de diffraction d'une sphère diélectrique de permittivité 16 et de rayon d'environ un dixième de longueur d'onde (onde incidente venant de la gauche).

inconvenient est d'avoir recours à des résonateurs diélectriques. Ces résonateurs diélectriques peuvent se présenter sous forme de sphères dont les résonances électriques et magnétiques sont facilement prédictibles par la théorie de Mie. A partir de ces résonateurs, il est possible d'obtenir des milieux se comportant comme des dipôles magnétiques ou

électriques en ajustant le diamètre des sphères. Une des propriétés remarquables de ces structures vient aussi du fait qu'à certaines longueurs d'ondes leurs contributions électrique et magnétique peuvent intervenir à la même longueur d'onde avec une contribution égale. En tirant avantage de cette caractéristique [10], on peut réaliser des milieux qui, éclairés par une source, réémettent l'onde incidente uniquement dans la direction de propagation (figure 4) ou à l'opposé. Ce phénomène peut être interprété en termes d'indice et d'impédance comme correspondant à un milieu homogène d'indice nul et d'impédance égale à celle du vide.

Conclusion

Dans cet article, nous avons passé en revue différentes façons de réaliser des métamatériaux afin de faire de l'ingénierie d'indice complexe. Ces structures peuvent être utilisées dans différents secteurs (antennes, structures absorbantes, radômes...).

Références

- [1] D. Smith, W. Padilla, D. Vier, S. Nemat-Nasser & S. Schultz, "Composite medium with simultaneously negative permittivity and permeability", *Physical Review Letter*, vol. 84, p. 4184, (2000).
- [2] D. Schurig, J. J. Mock, B. J. Justice, S. A. Cummer, J. B. Pendry, A. F. Starr & D. R. Smith, "Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies", *Science* 314 (5801): 977-80. (2006).
- [3] J. Valentine, S. Zhang, T. Zentgraf, E. Ulin-Avila, D. A. Genov, G. Bartal & X. Zhang, "Three-Dimensional Optical Metamaterial with a Negative Refractive Index", *Nature* 455, 376-379. (2008).
- [4] B. Rolly, B. Bebey, S. Bidault, B. Stout & N. Bonod, "Promoting Magnetic Dipolar Transition in Trivalent Lanthanide Ions with Lossless Mie Resonances", *Phys. Rev. B* 85, 245432 (2012).
- [5] A. Ourir, R. Abdeddaim & J. de Rosny, "Tunable Trapped Mode in Symmetric Resonator Designed for Metamaterials", *PIER*, vol.101, pages 115-123,2010.
- [6] B. Kanté, S. N. Burokur, A. Sellier, A. de Lustrac, J. M. Lourtioz, "Controlling Plasmon Hybridization for Negative Refraction Metamaterials", *Physical Review B*, vol. 79, Issue 7, 2009.
- [7] D. Felbacq, G. Bouchitté, "Homogenization of a set of parallel fibers", *Waves in Random Media* 7, p. 245-256, 1997.
- [8] J. Pendry, A. Holden, D. Robbins & W. Stewart, "Magnetism from Conductors and Enhanced non Linear Phenomena", *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, vol. 47, p. 2075, (1999).
- [9] R. Abdeddaim, A. Ourir & J. de Rosny, "Realizing a Negative Index Metamaterial by Controlling Hybridization of Trapped Modes", *Physical Review B*, 83, 033101, 2011.
- [10] J. M. Geffrin, B. Garcia-Cámara, R. Gómez-Medina, P. Albella, L. S. Froufe-Pérez, C. Eyraud, A. Litman, R. Vaillon, F. González, M. Nieto-Vesperinas, J. J. Sáenz & F. Moreno, "Magnetic and Electric Coherence in Forward- and Back-Scattered Electromagnetic Waves by a Single Dielectric Subwavelength Sphere", *Nature Communications* (2012) 3: 1171, 2012.
- [11] G. Guida, D. Maystre, G. Tayeb & P. Vincent, "Mean-Field Theory of Two-Dimensional Metallic Photonic Crystals", *J. Opt. Soc. Am. B* 15, p.2308-2315, 1998.
- [12] R. Abdeddaim, G. Guida, A. Priou, B. Gallas & J. Rivory, "Negative Permittivity and Permeability of Gold Square Nanospirals", *Applied Physics Letters*, Vol. 94, Issue 8, 081907, 2009.
- [13] A. Ourir, R. Abdeddaim & J. de Rosny, "Double-T Metamaterial for Parallel and Normal Transverse Electric Incident Waves", *Optics Letters*, Vol. 36, Issue 9, pp. 1527-1529 (2011).

LES AUTEURS

REDHA ABDEDDAIM est né le 24 février 1979. Il a rejoint l'institut Fresnel en 2011, il est actuellement enseignant chercheur IUT de Marseille, à l'Université d'Aix-Marseille. Ses intérêts actuels sont principalement liés à l'étude expérimentale de structures résonantes à indice complexe à base de métamatériaux.

ABDELWAHEB OURIR est né en Tunisie. Il est actuellement ingénieur de recherche CNRS à l'Institut Langevin (ESPCI). Ses principaux intérêts de recherche portent sur les phénomènes ondulatoires dans les matériaux fonctionnels électromagnétiques, métamatériaux et des milieux artificiels et leurs applications en micro-ondes et l'optique.

JEAN-MICHEL GEFFRIN est ingénieur de recherche CNRS à l'Institut Fresnel, il développe des dispositifs et des instruments de mesure en microonde pour l'observation des phénomènes de diffraction.

Ces dernières années il a notamment travaillé sur des applications de l'analogie microonde.

JULIEN DE ROSNY est chargé de recherche CNRS à l'Institut Langevin. Ses travaux concernent l'étude de propagation des ondes acoustiques et électromagnétiques dans les milieux périodiques localement résonants comme les métamatériaux mais également dans les milieux désordonnés.

GERARD TAYEB est né le 11 novembre 1959. Il a rejoint le Laboratoire d'Optique Électromagnétique en 1985 (qui est maintenant dans l'Institut Fresnel) et est actuellement professeur à l'Université d'Aix-Marseille. Ses intérêts actuels sont principalement liés à l'étude de cristaux photoniques et des métamatériaux.