



L'ÉLECTROMAGNÉTISME, 150-1 UNE SCIENCE EN PLEINE ACTION !

Métamatériaux, une solution pour l'ingénierie d'indice complexe Metamaterials, a way for engineering of complex index

Redha Abdeddaim^{*}, Abdelwaheb Ourir^{**}, Jean-Michel Geffrin^{*}, Julien Derosny^{**}, Gérard Tayeb^{*}

^{*}Institut Fresnel, CNRS, Aix-Marseille Université, Ecole Centrale Marseille, Campus de St Jérôme, 13013 Marseille, France

^{**}Institut Langevin, CNRS, ESPCI, 1, rue Jussieu 75238 Paris, France

Redha.abdeddaim@fresnel.fr, a.ourir@espci.fr, Jean-Michel.geffrin@fresnel.fr, julien.derosny@espci.fr, gerard.tayeb@fresnel.fr

Métamatériaux, indice complexe, hybridation de modes, résonance magnétique, résonance électrique, permittivité

Résumé

Dans cet article, nous allons mettre en évidence l'utilité des métamatériaux dans le domaine de l'ingénierie d'indice. Nous montrerons qu'à l'aide de ces structures, il est possible de mimer le comportement de milieux homogènes possédant des valeurs de permittivité, de perméabilité et d'indice de réfraction donnés en réalisant des structurations macroscopiques de motifs élémentaires simples. Les métamatériaux sont donc une alternative attrayante à la structuration microscopique de la matière.

Introduction

L'apparition des métamatériaux au début des années 2000 [1] a ouvert de nouvelles perspectives dans le domaine des interactions onde électromagnétique-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 de la théorie du couplage. Dans cet article, nous illustrerons 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 étudierons ensuite le cas des résonateurs métalliques qui permettent d'obtenir une perméabilité négative [8]. Ensuite, nous nous intéresserons aux réseaux de structures hybridées [9] qui permettent d'obtenir un indice négatif sans avoir recours à des résonateurs magnétiques. Enfin, nous aborderons 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 excitables dans ces structures [10].

1. Ingénierie de la permittivité

Une des méthodes les plus simples pour réaliser des milieux de permittivité négative 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-dessous. Il est donc évident qu'à l'aide d'une structure très simple, il est possible de mimer le comportement d'un milieu homogène. 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.

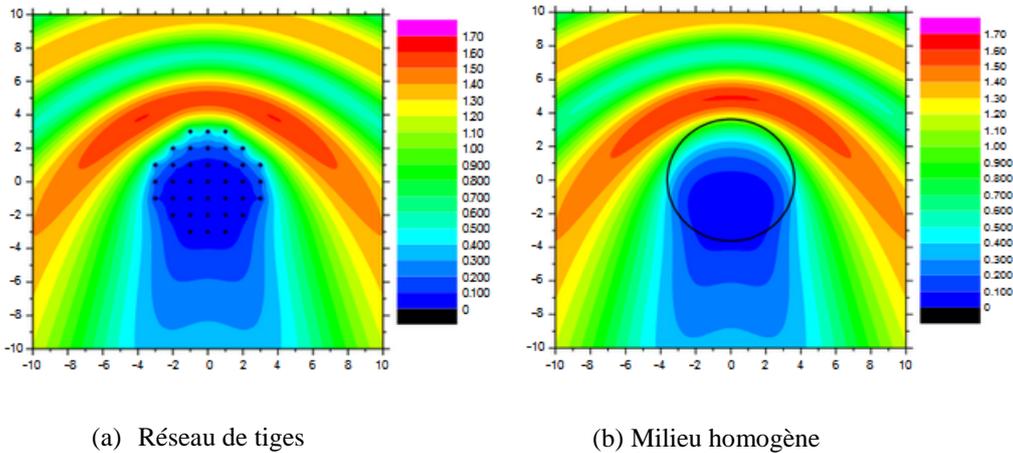


Figure 1 : Comparaison entre la réponse d'un réseau de tiges et d'un milieu homogène [11]

2. 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. La perméabilité s'exprime dans ce cas de la façon suivante [8] :

$$\mu = 1 - \frac{\pi r^2 / a^2}{1 + 2ip / \omega r \mu_n - 3dc^2 / \pi^2 \omega^2 r^3} \tag{2}$$

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 microonde. Une alternative pour atteindre des fréquences plus élevées est l'utilisation des milieux chiraux comme illustré par la figure 2.

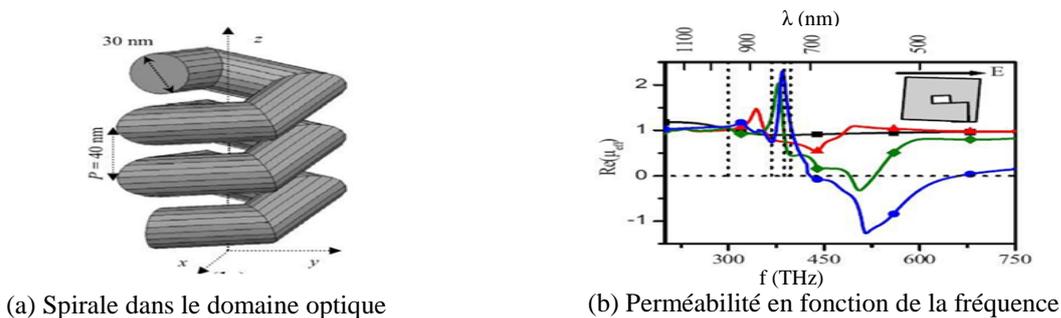


Figure 2 : Évolution de la perméabilité en fonction du nombre d'enroulements de la spire ($n=1, r=2, v=3, b=4$) [12].

3- 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 structures couplées dites à modes hybridés [6]. Effectivement, si on superpose deux résonateurs électriques dans la direction de propagation, le mode électrique fondamental (ω_0) 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 3.a et la réponse fréquentielle figure 3.b. Avec cette méthode, il devient facile d'agir sur ces deux modes 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 3.b), et de les coupler et obtenir un indice complexe donné. La figure 3.c montre un exemple de réalisation d'un milieu isotrope à indice négatif [13] conçu avec cette méthode.

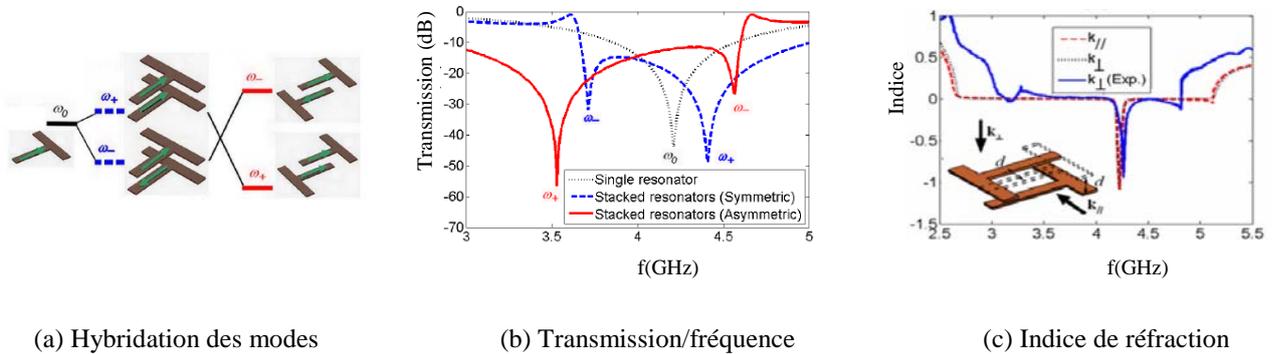


Figure 3 : Milieu isotrope à indice négatif par hybridation de modes [13]

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. 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 4.a), on arrive à faire exister deux modes, le premier étant le fondamentale (ω_{0H}) et le second étant un mode piégé (ω_{1H}). On se retrouve donc avec deux modes électriques au lieu d'un (figure 4.b.c). Ensuite, il suffit d'hybrider ce résonateur 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 4.d) sans briser la symétrie du réseau [9].

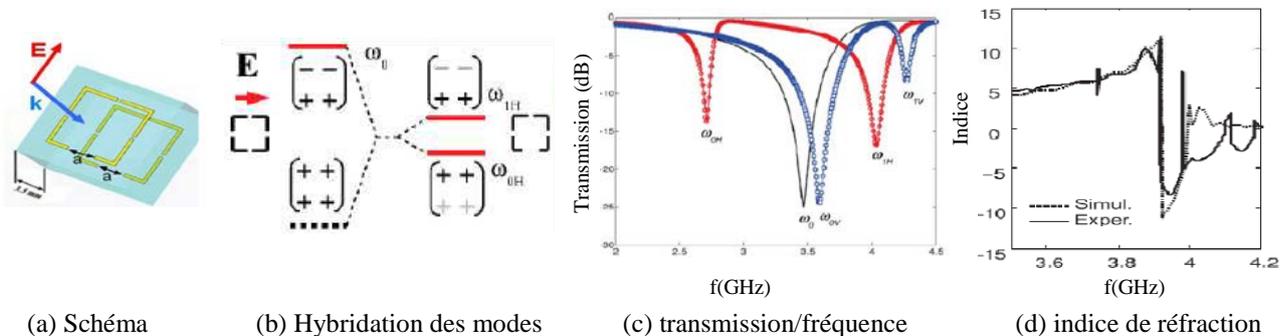


Figure 4 : Milieu à d'indice négatif obtenu par hybridation de modes piégés

4- Résonateur diélectrique

Toutes les structures que nous avons utilisées précédemment sont métalliques ce qui limite leur utilisation dans le domaine optique (où on ne peut plus négliger les pertes dans les métaux). Une méthode pour lever cette contrainte est d'avoir recours à des résonateurs diélectriques. Ces résonateurs diélectriques peuvent se présenter sous forme de sphères et exhibent des résonances électriques et magnétiques 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 simplement les dimensions des sphères. Une des propriétés remarquables de ces structures vient du fait qu'à certaines longueurs d'ondes leurs contributions électrique et magnétique peuvent intervenir à la même longueur d'onde avec une pondération égale. En tirant avantage de cette caractéristique [10], on peut réaliser des milieux qui, éclairés par une source, réémettent l'onde incidente d'une façon directive dans la direction de propagation (cf. figure 5). 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.

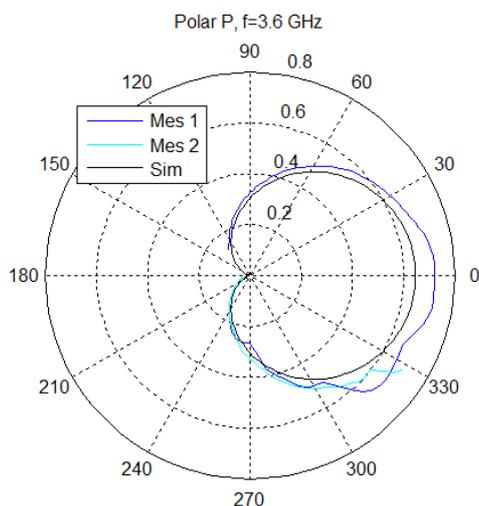


Figure 5 : Mesures et simulation du diagramme de diffraction d'une sphère diélectrique de permittivité 16 et de diamètre voisin d'un dixième de longueur d'onde (onde incidente venant de la gauche)

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 bibliographiques

- 1- D. Smith, W. Padilla, D. Vier, S. Nemat-Nasser and S. Schultz, "Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity," *Physical Review Letter*, vol. 84, p. 4184, (2000).
- 2- Schurig, D.; Mock, J. J.; Justice, B. J.; Cummer, S. A.; Pendry, J. B.; Starr, A. F.; Smith, D. R. "Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave Frequencies". *Science* 314 (5801): 977-80. (2006).
- 3- Jason Valentine, Shuang Zhang, Thomas Zentgraf, Erick Ulin-Avila, Dentcho A. Genov, Guy Bartal & Xiang 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, and J. De Rosny, « Tunable trapped mode in symmetric resonator designed for metamaterial », *PIER*, vol. 101, page 115-123, 2010.
- 6- Kanté, B.; Burokur, S. N.; Sellier, A.; de Lustrac, A.; Lourtioz, J.-M. , "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 and W. Stewart, "Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena," *IEEE transactions on microwave theory and techniques*, vol. 47, p. 2075, (1999).
- 9- R. Abdeddaim, A. Ourir, and J. de Rosny, « Realizing a negative index metamaterial by controlling hybridization of trapped modes », *Physical Review B*, 83, 033101, 2011.
- 10- Geffrin J.-M., García-Cámara B., Gómez-Medina R., Albellá P., Froufe-Pérez L.S., Eyraud C., Litman A., Vaillon R., González. F., Nieto-Vesperinas M., Sáenz J.J., Moreno F. , "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, and J. Rivory, « Negative permittivity and permeability of gold square nanospirals » *Applied Physics Letters*, Vol.94, Issue. 8, 081907, 2009.
- 13- A. Ourir, R. Abdeddaim, and J. De Rosny, « Double T Metamaterial for TE waves », *Optics Letters*, Vol. 36 Issue 9, pp.1527-1529 (2011)