

CONCEPTION ET RÉALISATION DE MÉTAMATÉRIAUX

O. ACHER, J.-M. LERAT, N. MALLÉJAC, M. LEDIEU, J.-H. LE GALLOU
CEA - Le Ripault

Depuis une décennie, le domaine des matériaux connaît un essor considérable dans la communauté de l'électromagnétisme. Le CEA - DAM a apporté plusieurs contributions significatives à ce domaine, en particulier en mettant au point une méthode de calcul des propriétés des métamatériaux. Cette méthode permet d'appréhender visuellement leur comportement, et se révèle particulièrement efficace pour aider à leur conception. Nous donnons un exemple particulier de métamatériau conçu par cette méthode. Nous observons un excellent accord entre les propriétés mesurées, et celles prédites à l'aide de notre modèle.

Depuis moins d'une décennie, la communauté des hyperfréquences et de l'optique a montré qu'il est possible de créer des matériaux présentant des propriétés qui ne se trouvent pas dans la nature. Ils sont appelés métamatériaux. Ces métamatériaux ouvrent la voie à des réalisations remarquables, comme des lentilles

quasi-parfaites [1], et des revêtements de furtivité semblables à des "capas d'invisibilité" [2]. En quelques années, une large communauté scientifique s'est mobilisée sur la thématique "métamatériaux", avec plus de 630 articles dans des revues scientifiques en 2007. le CEA - DAM a participé, dès l'origine, à cette

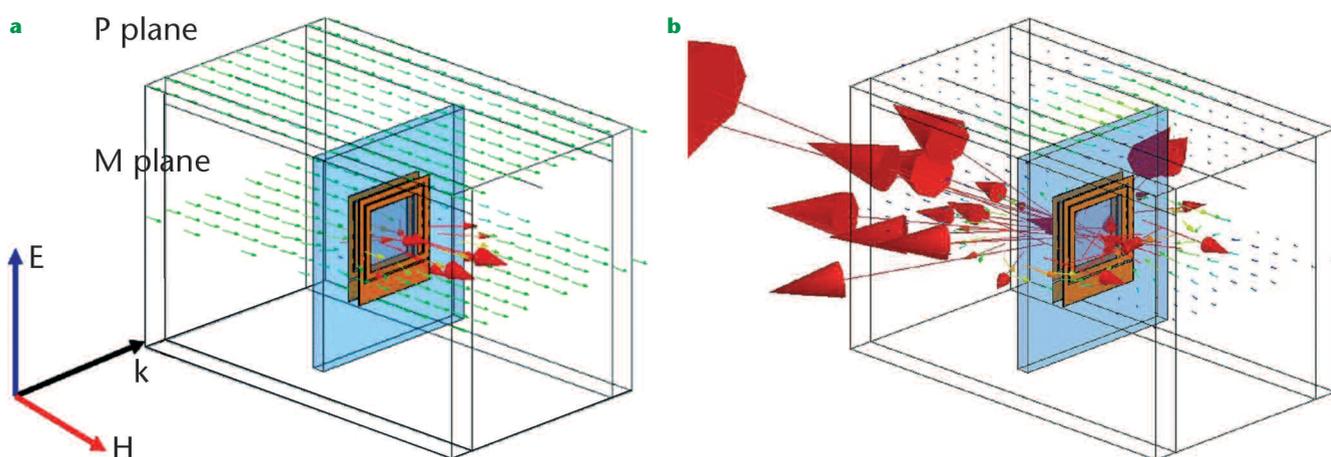


Figure 1

Champ magnétique hyperfréquence à l'intérieur de la cellule élémentaire d'une lame de métamatériau.

La couleur des flèches dans la cellule élémentaire correspond à l'intensité du champ magnétique hyperfréquence local :

a pour une fréquence d'éclairement inférieure à la fréquence de résonance ;

b pour une fréquence d'éclairement immédiatement au dessus de la fréquence de résonance.

Les champs à l'intérieur du motif conducteur en spirale sont à l'origine de la perméabilité du métamatériau, supérieure à l'unité dans le cas **a**, et négative dans le cas **b**.

dynamique, en rapportant la première réalisation d'un matériau diélectrique accordable à l'aide d'un champ magnétique, et la première réalisation d'un matériau magnétique accordable à l'aide d'une commande électrique [3].

Comment calculer les propriétés électromagnétiques d'un métamatériau ?

Les métamatériaux sont des composites comportant des inclusions (le plus souvent métalliques) dont la forme particulière conduit à des propriétés originales. La possibilité d'obtenir des propriétés magnétiques hyperfréquences, à partir de constituants qui n'en possèdent aucune, n'est pas intuitive ! Cette capacité, largement démontrée depuis quelques années, va à l'encontre des lois d'homogénéisation classiquement utilisées pour prédire les propriétés d'un composite à partir de celles de ces constituants. L'existence de logiciels commerciaux de simulation électromagnétique, performants, a permis de lever cette difficulté. C'est souvent à partir d'expériences numériques, en observant le comportement des ondes réfléchies et transmises par une lame de métamatériau, que les paramètres électromagnétiques du métamatériau en question sont déduits.

En 2007, notre équipe a apporté une contribution significative dans ce domaine, en proposant une méthode performante de calcul des propriétés électromagnétiques des métamatériaux [4]. Cette méthode a été bien accueillie par la communauté (ce qui nous a conduit à effectuer

des présentations invitées dans plusieurs conférences internationales). Cette méthode repose sur l'interprétation des champs électromagnétiques présents dans une cellule élémentaire du métamatériau. Dans le cas d'un métamatériau qui ne comporte aucun constituant magnétique, nous avons montré que la perméabilité μ du composite doit être définie par la relation :

$$\mu = \frac{\langle H \rangle_V}{\langle H \rangle_P} \quad (1)$$

Dans cette formule, $\langle \cdot \rangle_V$ est la moyenne du champ H sur le volume de la cellule élémentaire, alors que $\langle \cdot \rangle_P$ est la moyenne sur la face de la cellule élémentaire perpendiculaire au champ électrique incident. Cette représentation est utile pour guider l'intuition du concepteur de métamatériau, comme l'illustre la figure 1. La figure 1a représente la carte du champ magnétique à l'intérieur de la cellule élémentaire d'une lame de métamatériau, éclairée par une onde à une fréquence inférieure à la résonance. Nous constatons qu'à l'intérieur du motif en spirale, le champ magnétique est plus important que dans le plan P : la relation (1) permet d'en déduire que la perméabilité est supérieure à l'unité. La figure 1b correspond à une fréquence légèrement plus élevée : nous constatons que le champ magnétique dans le motif spiralé est orienté à l'opposé du champ dans le plan P . La relation (1) permet d'en déduire immédiatement que la perméabilité est inférieure à l'unité, voire négative.

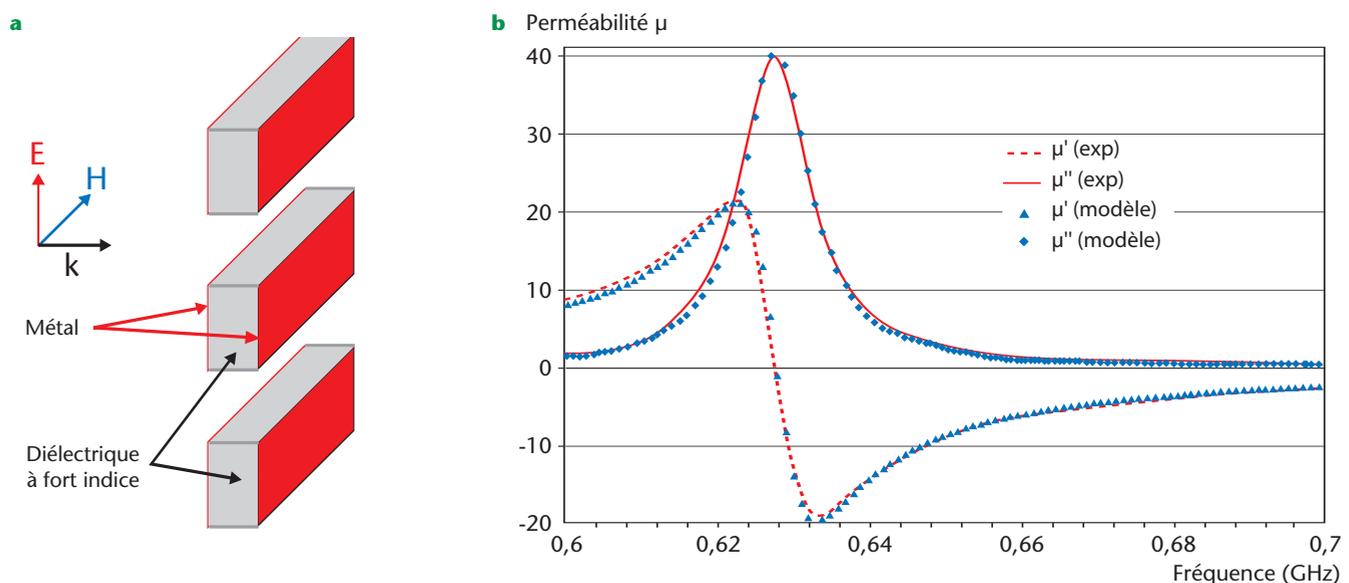


Figure 2

a Schéma d'un réseau diélectrique métallisé.

b Perméabilité magnétique d'un tel réseau, mesurée (en rouge) et calculée à l'aide de la relation (2) (en bleu).

Application à l'ingénierie de réseaux diélectriques métallisés

Dans certains cas, nous savons calculer analytiquement le champ à l'intérieur d'un matériau. Nous nous sommes intéressés au cas d'un réseau de matériau à forte constante diélectrique, métallisé sur deux de ses faces (*figure 2a*). À partir de la description analytique du champ dans le matériau, nous avons montré que la perméabilité du matériau est donnée par :

$$\mu = f \frac{\tan(k a)}{k a} + (1 - f) \quad (2)$$

où f est la fraction volumique en matériau diélectrique, $2a$ la largeur des lames du réseau, et k le vecteur d'onde dans le diélectrique.

Des échantillons ont été réalisés et caractérisés sur une large gamme de fréquence. Un excellent accord a été obtenu avec le calcul [5]. Au voisinage immédiat de la résonance, sur une bande de fréquence étroite, les niveaux de perméabilité atteignent des valeurs élevées, parmi les plus importants rapportés dans la littérature. La qualité de l'accord observé sur la *figure 2b* valide notre capacité de conception électromagnétique des matériaux, et l'efficacité des outils que nous avons développés. Notre méthode est maintenant utilisée avec succès par d'autres équipes, notamment pour concevoir des capes d'invisibilité fonctionnant dans le domaine du THz.

Références

- [1] J. B. PENDRY, "Negative refraction makes a perfect lens", *Phys. Rev. Lett.*, **85**, p. 3966-3969 (2000).
- [2] J. B. PENDRY, D. SCHURIG, D. R. SMITH, "Controlling electromagnetic fields", *Science*, **312**, p. 1780-1782 (2006).
- [3] O. REYNET, O. ACHER, "Voltage controlled artificial permeability of a diode loaded metamaterial", *Appl. Phys. Lett.*, **84**, p. 1198 (2004).
- [4] O. ACHER, J.-M. LERAT, N. MALLÉJAC, "Evaluation and illustration of the properties of Metamaterials using Field Summation", *Optics Express*, **15**, p. 1096-1106 (2007).
- [5] O. ACHER, J.-H. LE GALLOU, M. LEDIEU, "Design and measurement of negative permeability metamaterials made from conductor-coated high index dielectric inclusions", *Metamaterials*, à paraître, <http://dx.doi.org/10.1016/j.metmat.2007.10.001>.