

Métamatériaux / Metamaterials

Les matériaux magnétiques hyperfréquences à l'ère des métamatériaux

Olivier Acher

CEA Le Ripault, DAM, 37260 Monts, France

Disponible sur Internet le 12 mai 2009

Résumé

On s'intéresse dans cet article à l'apport des métamatériaux en vue d'obtenir des perméabilités magnétiques hyperfréquences attrayantes. On analyse les avantages et les inconvénients des métamatériaux par rapport aux matériaux magnétiques doux, traditionnellement utilisés en hyperfréquences en tant que matériaux à haute perméabilité. On montre que les niveaux obtenus avec les métamatériaux constitués uniquement de motifs conducteurs ne peuvent pas entrer en compétition avec ceux obtenus sur des matériaux magnétiques doux, tout du moins à des fréquences inférieures à 10 GHz. Toutefois, pour certaines applications particulières, comme les étalons de perméabilité, les métamatériaux présentent un attrait certain. La combinaison de matériaux magnétiques doux, et de motifs inductifs, présente au contraire de nombreux attraits. On donne plusieurs exemples de tels métamatériaux, réalisables avec des technologies qui peuvent s'adapter à des fabrications en grande série. Enfin, on souligne que la communauté des métamatériaux a donné un élan bénéfique à la diffusion des connaissances associées au magnétisme hyperfréquence, et à la conception de matériaux complexes alliant constituants magnétiques et composants électroniques. *Pour citer cet article : O. Acher, C. R. Physique 10 (2009).*

© 2009 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Abstract

Hyperfrequency magnetic materials in the era of metamaterials. This article investigates the advances brought by metamaterials in order to obtain attractive magnetic microwave properties. Can magnetic metamaterials outperform conventional soft magnetic materials? In the case where permeability levels and bandwidth are the key figures of merit, it is acknowledged that copper-based metamaterials can exceed the performance of soft magnetic materials, but only at operating frequencies above 10 GHz. As for low frequency operation, magnetic metamaterials may also be preferred to conventional magnetic materials when requirements include excellent temperature stability or immunity to external magnetic fields. However, in many cases, metamaterials need to include certain conventional magnetic constituents in order to compete with conventional magnetic materials. Several types of metamaterials containing conventional magnetic inclusions and well suited for industrial production are presented. Last but not least, it is underlined that the investigations on metamaterials are beneficial to scientific exchanges between scientists from different areas. *To cite this article: O. Acher, C. R. Physique 10 (2009).*

© 2009 Académie des sciences. Publié par Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Mots-clés : Métamatériaux magnétiques ; Hyperfréquence

Keywords : Magnetic metamaterials; Hyperfrequency

Adresse e-mail : olivier.acher@cea.fr.

1. Introduction

Lorsque l'on évoque les matériaux magnétique hyperfréquences, on pense généralement aux ferrites, aux grenats, aux métaux et alliages ferromagnétiques. Ces matériaux, contenant du fer pour la plupart, peuvent présenter une perméabilité magnétique hyperfréquence μ très différente de l'unité sur certaines plages de fréquences. Au contraire, on considère souvent comme évident que pour des constituants non magnétiques, $\mu = 1$ indépendamment de la fréquence. Ce serait donc le privilège des matériaux magnétiques de posséder une perméabilité remarquable ! Ils sont effectivement utilisés à ce titre dans de nombreux dispositifs, comme les transformateurs, les inducteurs, les têtes d'enregistrement magnétiques, certains filtres hautes fréquences, des absorbants radars, etc. Le développement récent des métamatériaux a clairement montré que des inclusions ingénieusement conçues pouvaient elles aussi constituer des matériaux qui présentent une perméabilité hyperfréquence très différente de l'unité, sans contenir aucun matériau magnétique. Il apparaît que l'article « magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena » [1], par J.B. Pendry et collaborateurs a été essentiel dans cette prise de conscience, même si des travaux antérieurs avaient établi que certaines inclusions pouvaient présenter une perméabilité significative [2], longtemps avant que le terme « métamatériau » n'ait été créé. Par contre, le succès et la croissance extraordinaire de la thématique métamatériaux durant les dernières années conduisent à poser de manière plus forte la question : a-t-on encore besoin des matériaux magnétiques conventionnels ? La perméabilité « artificielle » (on désignera ainsi la perméabilité associée aux inclusions ne contenant pas de constituants magnétiques, lorsqu'elle est différente de l'unité) peut-elle remettre en question la suprématie des matériaux magnétiques conventionnels (dont l'aimantation à saturation est différente de zéro) ? Quels sont les domaines applicatifs de prédilection de chacune de ces familles de matériaux hyperfréquences ? Peut-on les combiner pour obtenir des matériaux encore plus performants ?

Cet article commence par rappeler les liens initiaux entre la communauté des métamatériaux et la communauté du magnétisme hyperfréquence. Ensuite, on compare les niveaux et les caractéristiques des spectres de perméabilité des métamatériaux, à ceux des matériaux magnétiques conventionnels. On montre que dans quelques cas, la perméabilité artificielle présente des avantages significatifs. Cependant, dans bien des cas, c'est en alliant des motifs conducteurs, et des matériaux magnétiques traditionnels, que l'on peut obtenir les performances optimales. Au-delà des seules performances, on discutera des enjeux relatifs aux technologies de fabrication, et aux pratiques de conceptions. Une version anglaise des analyses présentées ici a été rédigée de manière concomitante à la version française [3], et publiée dans une revue de magnétisme dans un recueil d'articles consacrés aux perspectives récentes sur les matériaux magnétiques hyperfréquences

2. Métamatériaux et matériaux magnétiques : des origines proches mais des quêtes distinctes

Alors que les progrès attendus dans le domaine des matériaux magnétiques hyperfréquences portent surtout sur les niveaux de perméabilité, les niveaux de pertes, et la maîtrise du spectre de perméabilité dans une gamme de fréquence s'étendant jusqu'à quelques GHz, la communauté des métamatériaux est engagée dans la recherche d'indices de réfraction négatifs, la réalisation de lentilles parfaites, et l'extension des propriétés dans le domaine THz ou optique [4]. Malgré ces différences fortes, il y a néanmoins de nombreuses interconnexions entre les métamatériaux et les matériaux magnétiques conventionnels. Un signe de ces liens forts est à rechercher dans la naissance même du mot « métamatériau ». Ce mot a été forgé par un chercheur reconnu dans le domaine du magnétisme hyperfréquence, R. Walser, dans ses relations avec la DARPA [5]. R. Walser a été un des pionniers de la mesure de la perméabilité des couches minces dans la gamme du GHz [6], et dans la compréhension des propriétés hyperfréquences des couches ferromagnétiques [7]. Bien que R. Walser se soit très fortement opposé aux directions de recherche prises ensuite sous la dénomination « métamatériaux », en particulier dans un pamphlet intitulé « wave refraction in negative-index media : always positive and very inhomogeneous » [8], la communauté du magnétisme hyperfréquence a été le lieu de naissance du terme et de certaines idées fondamentales relatives aux métamatériaux.

3. Comparaison des performances accessibles

3.1. Approche heuristique

Il est éclairant d'établir un parallèle entre les moyens de créer un champ magnétique statique \mathbf{B} , et les moyens de créer une réponse magnétique μ à haute fréquence. Ce parallèle est illustré par la Fig. 1. Les champs statiques peuvent

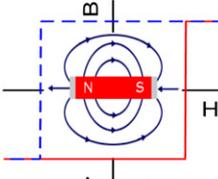
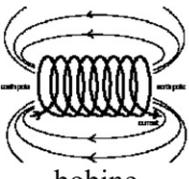
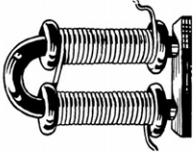
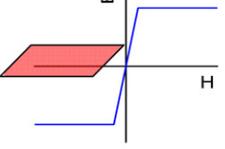
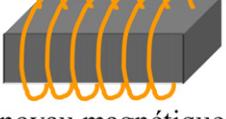
	Matériau	Courant	Matériau + Courant
Génération d'un champ B	 aimant	 bobine	 électroaimant
Réponse magnétique haute fréquence μ	 matériau magnétique doux	 Motif inductif	 noyau magnétique doux + motif inductif

Fig. 1. Analogie entre les moyens de créer un champ magnétique statique, et les inclusions présentant une perméabilité hyperfréquence élevée ou résonante.

être générés par des matériaux (les aimants permanents), par des courants (solénoïdes, bobines de Helmholtz, . . .), ou bien la combinaison de matériaux et de courants (électro-aimants). Dans le domaine de la réponse inductive haute fréquence, on sait bien qu'une perméabilité μ élevée peut résulter de la précession de l'aimantation d'un matériau magnétique doux (ferrite, ferromagnétique). Mais la perméabilité peut aussi résulter des courants induits dans un motif inductif par un champ magnétique hyperfréquence incident : c'est cette propriété qui est exploitée dans la plupart des métamatériaux pour créer leur perméabilité. Enfin, il est assez naturel de s'intéresser à l'équivalent hyperfréquence de l'électro-aimant, qui consiste en une combinaison de motifs inductifs, et de matériaux magnétiques conventionnels.

De nombreux chercheurs ont proposé des formes d'inclusions inductives qui permettent de réaliser des composites présentant une perméabilité hyperfréquence artificielle [1,4,9]. On a représenté quelques unes d'entre elles sur la Fig. 2. Le principe de fonctionnement de ces différents motifs est identique : le champ magnétique hyperfréquence incident, normal au plan de la boucle, génère un courant induit dans la boucle. A des fréquences proches de la fréquence de résonance de l'inclusion, que l'on peut décrire comme un système LC, le courant induit est grand, et ce courant génère une induction magnétique importante dans un volume entouré par cette boucle. La perméabilité, qui est le rapport entre l'induction magnétique totale et le champ magnétique extérieur, présente donc un module élevé au voisinage de la fréquence de résonance.

Il existe aussi des inclusions à base de matériau diélectrique à haut indice [2,10,11], ou des combinaisons de matériaux à haut indice et de conducteurs [12], qui présente des perméabilités résonantes. En dépit de cette diversité, la perméabilité obtenue avec les inclusions magnétiques artificielles présente un certain nombre de caractères communs. Aussi, il est possible de comparer leurs caractéristiques et leurs mérites, par rapport aux matériaux magnétiques conventionnels.

Les matériaux magnétiques doux sont parfois aussi utilisés pour leurs propriétés non réciproques, obtenues à l'état aimanté. Au contraire, les métamatériaux à base de conducteur sont des matériaux réciproques.

3.2. Les niveaux de perméabilité

Les matériaux magnétiques hyperfréquences traditionnels sont généralement recherchés pour leurs niveaux de perméabilité élevés. Pour des applications en tant que noyau d'inducteur, noyau de transformateur, têtes d'enregistrement magnétique, on recherche des niveaux de pertes faibles. Au contraire, pour des applications dans des filtres ou des absorbeurs de parasites hautes fréquences, on cherche des niveaux de perte élevés dans la bande de fréquence à rejeter. Le spectre de perméabilité typique d'un film mince magnétique est représenté sur la Fig. 3(a) [13]. La partie du spectre située nettement en dessous la fréquence de résonance est bien adaptée aux applications sans pertes. La partie du spectre au voisinage de la fréquence de résonance répond aux exigences des applications à pertes. Au-delà, la perméabilité réelle est inférieure à l'unité (et même négative sur une partie du spectre), avec des niveaux de pertes

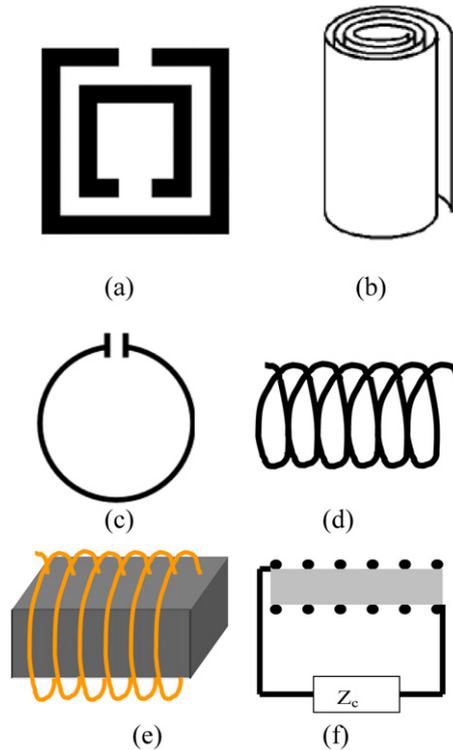


Fig. 2. Schéma de différents motifs inductifs proposés pour créer des métamatériaux présentant une perméabilité artificielle ; (a) résonateur à double anneau fendu ; (b) motif «rouleau Suisse» ; (c) anneau chargé par une capacité ; (d) solénoïde ; (e) solénoïde autour d'un noyau magnétique ; (f) solénoïde avec noyau magnétique et charge électronique.

faibles. Ce domaine spectral semblait jusqu'à récemment sans application, jusqu'à ce que des travaux récents mettent en évidence la possibilité de diminuer l'effet de peau dans les conducteurs classiques grâce à un ajout de tel matériau magnétique [14,15], et que plus généralement les études sur les métamatériaux montrent l'intérêt d'une perméabilité négative, ou comprise entre 0 et 1.

Puisque la majeure partie des applications actuelles des matériaux magnétiques hyperfréquences requiert une perméabilité élevée, le niveau de perméabilité paraît être un bon critère de qualité pour comparer les performances des métamatériaux aux matériaux magnétiques traditionnels. Le spectre de perméabilité typique d'un métamatériau est représenté sur la Fig. 3(b). A des fréquences nettement inférieures à la fréquence de résonance, la perméabilité tend vers $\mu'_0 = 1$. Cette propriété est une conséquence directe du théorème de Hashin Strikman, rappelé dans la référence [16]. Si tous les constituants du composite ont une perméabilité qui vaut l'unité, ce théorème prévoit que la perméabilité du composite ne peut être que l'unité. Ce théorème n'est valable qu'à fréquence nulle. Une autre explication intuitive est que ce sont les courants induits qui sont responsables de la perméabilité artificielle des métamatériaux. Or la loi de Lenz indique que ces courants induits ne peuvent exister que dans le cas où le champ magnétique varie au cours du temps. À l'autre extrémité du spectre, pour des fréquences très élevées, les motifs conducteurs écrantent le champ électromagnétique incident, et les inclusions présentent un comportement diamagnétique : l'induction créée s'oppose au champ magnétique incident. En conséquence, la perméabilité haute fréquence tend vers une valeur μ'_∞ comprise entre 0 et 1. Les matériaux magnétiques traditionnels présentent eux des niveaux de perméabilité à basse fréquences μ'_0 qui peuvent être très grands (ils peuvent excéder 10^3), et une perméabilité haute fréquence $\mu'_\infty = 1$ dans le cas où l'effet de peau est négligeable. Les métamatériaux ne présentent des niveaux élevés de perméabilité que au voisinage de la fréquence de résonance. Ces niveaux peuvent être très supérieurs à l'unité, mais la communauté des métamatériaux s'est assez peu intéressée aux niveaux maximaux de perméabilité atteignables. Il existe toutefois un certain nombre de résultats disponibles dans la littérature. Une perméabilité de 35 au voisinage de 20 MHz a été observée [17], ainsi que des niveaux de perméabilité supérieurs à 10 dans une bande de fréquence située au-delà de 1 GHz [12,18]. Le Tableau 1 fait apparaître des niveaux de perméabilité élevés observés à différentes fréquences.

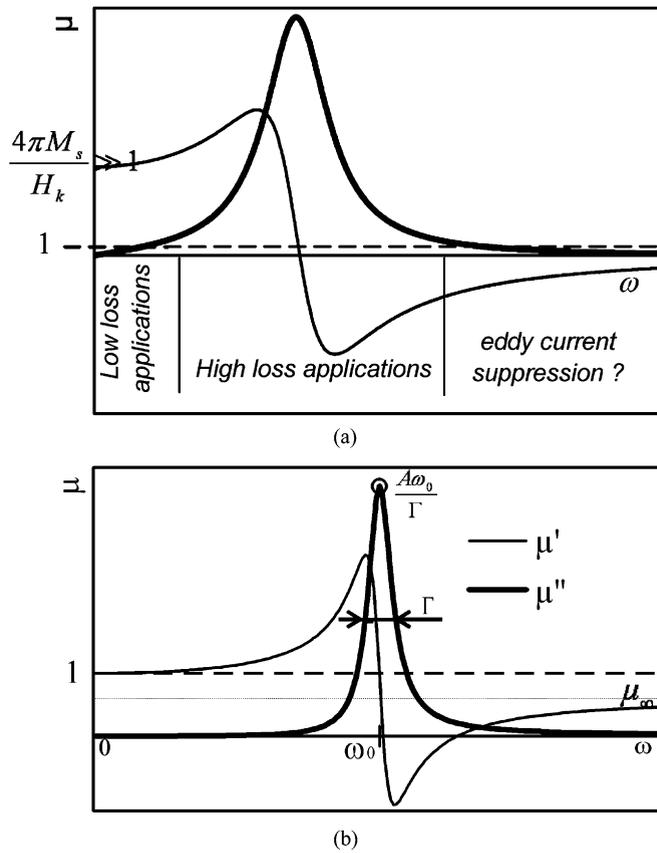


Fig. 3. (a) Spectre de perméabilité typique d’une couche mince magnétique douce ; (b) Spectre de perméabilité typique d’un métamatériau fabriqué à partir de constituants non magnétiques.

Tableau 1
Données issues de la littérature relatives aux métamatériaux à haute perméabilité.

F_r	$\mu' \text{ max}$	$\mu'' \text{ max}$	$F_r / \Delta F$	Ref.	Incl. type
21 MHz	17	35	60	[17]	Rouleau suisse
6 GHz	12	23	32	[18]	Anneaux fendus
2,7 GHz	2,5	2,8	17	[10]	Hélice
2,5 GHz	2,4	2,8	N.A.	[10]	Diélectrique
630 MHz	21	40	60	[12]	Métal/diélectrique
1,23 GHz	17	26	50	[12]	Métal/diélectrique

La seconde ligne du tableau mentionne un matériau présentant des maxima de perméabilité supérieurs à 10 à une fréquence proche de 6 GHz, ce qui excède les valeurs communément observées sur des matériaux magnétiques traditionnels [16]. Toutefois, le tableau souligne aussi que le pic de perméabilité est très étroit. Il n’est donc pas forcément facile d’obtenir des niveaux de perméabilité élevés avec des niveaux de perte faible, puisque les niveaux de μ' élevés sont observés à des fréquences proches du pic de μ'' , comme le représente la Fig. 3(b). On observe d’ailleurs sur le Tableau 1 que le niveau maximal de μ'' pour un métamatériau donné est supérieur au maximum de μ' , comme le schématise cette figure. Des travaux théoriques donnent une expression simple et générale pour la perméabilité de résonateurs inductifs sous la forme [8,1] :

$$\mu = 1 - \frac{A\omega^2}{\omega^2 - \omega_0^2 - j\Gamma\omega} \tag{1}$$

où ω est la pulsation, ω_0 , Γ et A sont des constantes ($|A| < 1$). Cette expression a été utilisée avec succès pour décrire la perméabilité de nombreux métamatériaux. L'équation (1) montre que dans le cas où la résonance est suffisamment étroite, il n'y a pas vraiment de borne sur le niveau maximal de perméabilité réelle ou imaginaire. Des perméabilités réelles élevées avec des pertes faibles sont permises par cette relation. Cela suggère qu'à fréquence donnée, les matériaux magnétiques artificiels pourraient être plus performants que des matériaux magnétiques traditionnels. Toutefois, cette supériorité ne serait valable que sur une bande de fréquence extrêmement étroite. Or, il a été établi qu'un composite réalisé à partir d'inclusions très résonantes n'est pas toujours homogénéisable [19,20]. En conséquence, il pourrait exister une impossibilité théorique d'assembler plusieurs inclusions très résonantes pour en faire un matériau présentant une perméabilité très élevée à une fréquence donnée. En conclusion, on retiendra que des métamatériaux présentant des perméabilités de quelques unités à quelques dizaines ont été fabriqués à partir de motifs conducteurs. Différentes démonstrations ont été présentées, avec des fréquences de résonance s'étalant sur une très large gamme de fréquence. Il apparaît possible de réaliser des inclusions qui présentent un pic de perméabilité très fin atteignant des valeurs très élevées, mais réaliser un composite à partir de ces inclusions se heurte à des obstacles théoriques et expérimentaux.

3.3. Performances large bande

On a montré dans le paragraphe précédent que la perméabilité d'un métamatériau à fréquence nulle est connue, et on connaît un encadrement pour sa perméabilité à fréquence infinie. Ces propriétés sont très utiles pour obtenir des résultats généraux sur la perméabilité des métamatériaux. A partir des relations de Kramers–Kroenig, on peut montrer que pour un métamatériau sans constituant magnétique [21] :

$$\int_0^{\infty} \frac{\mu''(\omega) d\omega}{\omega} = (1 - \mu_{\infty}) \frac{\pi}{2} \leq \frac{\pi}{2} \quad (2)$$

Au contraire, pour un matériau magnétique doux traditionnel,

$$\int_0^{\infty} \frac{\mu''(\omega) d\omega}{\omega} = \frac{\pi}{2} (\mu'_0 - 1) \gg \frac{\pi}{2} \quad (3)$$

Les équations (2) et (3) montrent qu'à basse fréquence, il est possible d'obtenir des niveaux de μ'' beaucoup plus élevés sur de larges bandes de fréquence avec des matériaux magnétiques doux, qu'avec des métamatériaux constitués de motifs conducteurs. Pour comparer les niveaux de μ'' à haute fréquence dans les deux types de matériaux, il est pratique d'avoir recours à l'intégrale $\int_0^{\infty} \mu''(\omega) \omega d\omega$, qui pondère le μ'' par la fréquence.

Dans l'approximation d'un métamatériau qui résonne à la pulsation ω_r et possède un pic de perméabilité étroit, on peut déduire facilement de l'équation (2) que :

$$\int_0^{\infty} \mu''(\omega) \omega d\omega = \frac{\pi}{2} \omega_r^2 (1 - \mu_{\infty}) \quad (4)$$

Au contraire, pour un matériau magnétique doux traditionnel, il a été établi que [22] :

$$\int_0^{\infty} \mu''(\omega) \omega d\omega \leq \frac{\pi}{2} (\gamma 4\pi M_s)^2 \quad (5)$$

où γ est le rapport gyromagnétique et $4\pi M_s$ est l'aimantation à saturation du matériau. En comparant les équations (4) et (5), il est possible de montrer que l'intégrale des pertes magnétiques pondérées par la fréquence $\int_0^{\infty} \mu''(\omega) \omega d\omega$ peut être plus élevée pour un métamatériau que pour un matériau magnétique traditionnel dès lors que le premier résonne à une pulsation assez élevée : $\omega_r > \gamma 4\pi M_s$. En d'autres termes, un métamatériau peut avoir une réponse magnétique plus importante que les ferrites dès lors qu'il résonne au-delà de 10 GHz, et plus importante que n'importe quel matériau magnétique dès lors qu'il résonne au-delà de 100 GHz. L'intérêt des métamatériaux pour des applications à des fréquences très élevées est par exemple décrit dans [23].

Les matériaux magnétiques classiques peuvent être utilisés comme surface à haute impédance ($Z \gg 1$) pour des applications antennes, ou aussi comme absorbants micro-onde, ce qui correspond à une impédance unité visée ($Z = 1$). Bien que les matériaux diélectriques puissent aussi être utilisés pour ces applications, il a été établi que les matériaux magnétiques présentent des performances de largeur de bande sensiblement plus importantes que des matériaux diélectriques de même épaisseur. La loi de Rozanov indique que l'intégrale de l'atténuation apportée par un absorbant Radar est bornée par le produit de l'épaisseur du matériau par sa perméabilité basse fréquence μ'_0 [24]. Cette loi a été généralisée au cas des revêtements à haute impédance, dont le facteur de mérite est proportionnel à cette même quantité [25]. Du fait que les métamatériaux réalisés à base de conducteurs vérifient $\mu'_0 = 1$, ces matériaux présentent les mêmes limitations en terme de performances que des diélectriques. La règle de Rozanov a été démontré dans le cas de systèmes passifs, et peut ne pas s'appliquer à des métamatériaux comportant des composants électroniques qui apportent de l'énergie [26]. Cependant, il existe des limitations associées aux circuits actifs [27], en particulier en ce qui concerne leur stabilité [28].

En conclusion, des règles de somme indiquent que les matériaux magnétiques traditionnels restent beaucoup plus performants à bien des égards que les métamatériaux, dès lors que l'on travaille à des fréquences inférieures à 10 GHz et que l'on recherche des niveaux de perméabilité significatifs. Par contre, à des fréquences plus élevées, les métamatériaux peuvent présenter des niveaux de μ et des largeurs de bande qui excèdent ce qui peut être atteint avec un matériau magnétique à base de fer.

4. Des exemples de métamatériaux sans constituants magnétiques particulièrement performants

Il existe des cas où les métamatériaux se révèlent plus attrayants que des matériaux magnétiques doux, du fait de propriétés autres que les niveaux de perméabilité ou la largeur de bande. On donne ci-dessous quelques exemples.

4.1. Surfaces à haute impédance

Un design astucieux de matériaux présentant une perméabilité artificielle a été introduit par D. Sievenpiper et al. en 1999 [29]. Si ces matériaux n'ont pas été proposés sous l'appellation « métamatériaux », qui était à l'époque quasiment inconnue, il n'en existe pas moins une parenté très forte entre les « champs de champignons » proposés par Sievenpiper et les motifs inductifs utilisés dans les métamatériaux. Une telle surface constitue une alternative à une couche de matériau magnétique pour obtenir une impédance élevée. La perméabilité de ce matériau est aussi décrite par l'équation (1), avec $A = 100\%$ [30]. Ce système présente des caractéristiques intéressantes, comme l'accordabilité. Cependant, les limitations en terme de largeur de bande mentionnées plus haut s'appliquent. De plus, la stabilité des propriétés de haute impédance avec l'incidence et la polarisation présente des limitations [31].

4.2. Étalons de perméabilité

Les métamatériaux sont attrayants pour réaliser des étalons ou des échantillons de référence pour des mesures de perméabilité. Un certain nombre de dispositifs de mesure de la perméabilité hyperfréquence des matériaux, et en particulier des couches minces, nécessitent pour leur calibration un échantillon de perméabilité connue, stable dans le temps, et immune à des perturbations extérieures (température, champ magnétique). On utilise souvent des couches magnétiques connues, mais cette solution n'est pas totalement satisfaisante, car la perméabilité magnétique peut être affectée par le vieillissement de l'échantillon, la température, le champ magnétique extérieur, etc. Au contraire, les métamatériaux présentent des propriétés très stables, facilement prédictibles, et peuvent être fabriqués dans des conditions permettant une certification de la qualité des échantillons réalisés. On a présenté ailleurs [32] la réalisation et les performances d'un échantillon magnétique de référence fabriqué à partir de composants électroniques passifs. La perméabilité de ce matériau est représentée sur la Fig. 4(a). L'inclusion qui confère la perméabilité hyperfréquence à l'échantillon est photographiée sur la Fig. 4(b). Elle est constituée d'un inducteur connecté par une soudure à une capacité, les deux composants étant en technologie « Composant à Montage de Surface » (CMS). L'inducteur consiste en une dizaine de boucles de fil de cuivre autour d'un noyau céramique non magnétique, de diamètre inférieur à 1 mm. L'inclusion a une réponse magnétique lorsqu'elle est excitée par un champ magnétique hyperfréquence parallèle à son axe, à une fréquence proche de la résonance du circuit LC. On a démontré expérimentalement que cette inclusion

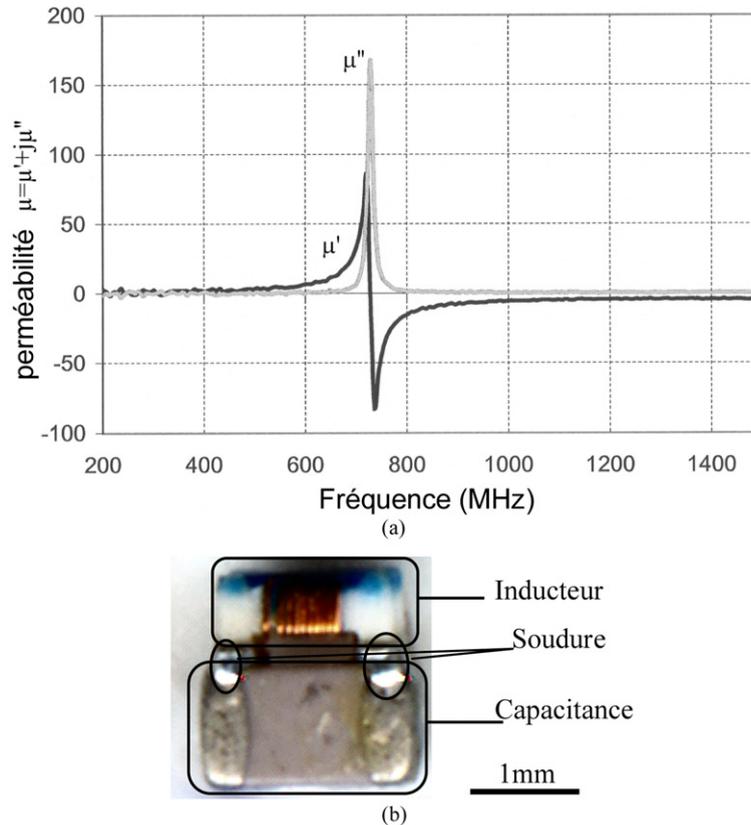


Fig. 4. (a) Spectre de perméabilité d'un métamatériau étalon de perméabilité ; (b) photo d'une inclusion constitutive de ce métamatériau.

possède une réponse magnétique totalement insensible au champ magnétique extérieur, ou aux variations de température. Il est également possible de construire des standards de perméabilité en utilisant des matériaux à forte constante diélectrique [12,33].

5. Exemples de combinaisons performantes de matériaux magnétiques doux et de motifs inductifs conducteurs

Il peut être attrayant de combiner les matériaux magnétiques doux et les motifs inductifs conducteurs afin de profiter des avantages des 2 types de matériaux. Cette combinaison est au magnétisme hyperfréquence ce que l'électro-aimant est à la génération de champ statique (Fig. 1). Comme dans le cas de l'électro-aimant, on peut s'attendre à ce que cette combinaison se révèle nettement supérieure dans un certain nombre de cas.

On peut pour cela insérer un matériau magnétique doux à l'intérieur d'un motif inductif (Fig. 2(e), 2(f)) [34,35]. La Fig. 2(f) représente une inclusion consistant en un noyau de perméabilité élevé, avec un enroulement de cuivre connecté à une charge capacitive. La perméabilité d'un métamatériau réalisé à partir d'une collection de telles inclusions s'écrit [34] :

$$\mu = 1 - \mu_c \frac{A\omega^2}{\omega^2 - \omega_0^2 - j\Gamma\omega} + A(\mu_c - 1) \quad (6)$$

où μ_c est la perméabilité magnétique du noyau. Cette relation est valable dans l'approximation $\Gamma/\omega_0 \ll 1$. On vérifie facilement que dans le cas où $\mu_c = 1$, l'équation (6) s'identifie à l'équation (1). Aux fréquences petites devant la fréquence de résonance, c'est à dire lorsque $\omega \ll \omega_0$, et lorsque la fraction volumique d'inclusions est $A = 100\%$, la perméabilité du métamatériau est égale à celle du noyau. Les métamatériaux comportant un noyau magnétique n'ont donc pas les limitations exprimées par la Fig. 3(b) (en particulier $\mu'_0 = 1$), ni par les équations (1), (2), (4). Il est donc

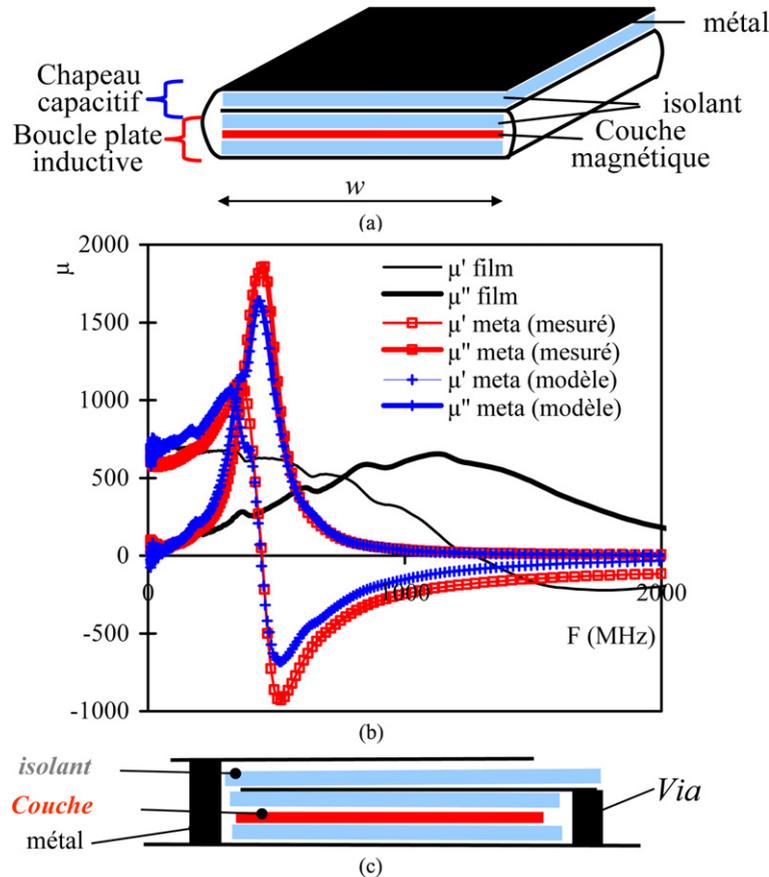


Fig. 5. Propriétés d'un métafilm magnétique : (a) schéma ; (b) perméabilité mesurée sur un film magnétique (traits continus), et sur un métamatériau réalisé à partir de ce film (carrés) ; la prédiction issue du modèle (équations (7)–(9)) est représentée avec des croix ; (c) schéma d'une possible configuration de métafilm magnétique réalisable avec des technologies planaires développées pour la microélectronique.

envisageable d'obtenir à la fois des perméabilités élevées, et une réponse spectrale façonnée au travers de l'ingénierie d'un motif conducteur [36]. La loi de Rozanov [24] établit l'intérêt potentiel d'une telle alliance : les matériaux magnétiques doux favorisent des niveaux de perméabilité élevés sur une bande de fréquence substantielle ; les motifs issus des métamatériaux facilitent beaucoup l'ingénierie de la réponse en fréquence. Par contre, on ne dispose pas toujours de technologies capables de réaliser de manière collective des métamatériaux associant matériaux magnétiques doux et motifs conducteurs. Les paragraphes suivants présentent plus en détails quelques-unes des familles de métamatériaux les plus prometteuses, alliant magnétisme traditionnel et magnétisme artificiel.

5.1. Métafilm magnétique en trombone

La microélectronique a donné naissance à des technologies de gravure de motifs conducteurs qui ont été utilisées très largement pour fabriquer des métamatériaux, ainsi qu'à une maîtrise du dépôt de films ferromagnétiques à haute perméabilité. Nous montrons ici comment en combinant ces deux éléments, il est possible d'obtenir des métamatériaux bénéficiant à la fois des avantages apportés par une couche magnétique douce, et de ceux apportés par un motif conducteur. Nous avons réalisé un échantillon selon la topologie représenté Fig. 5(a). Une couche magnétique douce d'alliage amorphe CoZr, d'épaisseur $e_L = 1 \mu\text{m}$, est déposée sur un substrat mince de mylar d'épaisseur e_C , et de constante diélectrique de cet isolant est ϵ . Un carré de $9 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$ de cette couche est posé sur un ruban constitué d'une feuille d'aluminium d'épaisseur $12 \mu\text{m}$, colaminée avec un film de mylar mince de largeur $W = 9 \text{ mm}$. On replie ensuite le ruban à la manière d'un trombone, en collant le tout. On note que toutes les dimensions de cet échantillon sont nettement plus petites que la longueur d'onde dans le vide, cela pour des fréquences allant jusqu'à plusieurs

GHz. La perméabilité μ_{ferro} du film ferromagnétique et la perméabilité μ_{meta} de l'échantillon de métamatériau ont été mesurées à l'aide d'un perméamètre décrit par ailleurs [37]. Par convention, on a rapporté la mesure de perméabilité du métamatériau à l'épaisseur de la couche magnétique, et non à l'épaisseur du « métafilme ». Les résultats expérimentaux sont reportés sur la Fig. 5(b). On voit que le métamatériau présente une résonance de perméabilité assez étroite, en dessous de 0,5 GHz, avec un maximum de perméabilité qui dépasse 1800, alors que le film de départ présente une résonance au voisinage de 1,25 GHz et une perméabilité qui n'excède pas 700. À l'aide d'une description par des composants électroniques localisés présentés ailleurs, [29,34], on prédit que la perméabilité du métafilme est décrite par :

$$\mu_{\text{meta}} = \frac{\mu_{\text{ferro}}}{1 - LC\omega^2} \quad (7)$$

où la capacitance C et l'inductance L sont données par :

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{W^2}{e_C} \quad (8)$$

$$L = \mu_0 \mu_{\text{ferro}} e_L \quad (9)$$

On notera que l'équation (7) peut aussi être obtenue simplement à partir de l'équation (6), en tenant compte du fait que $A = 100\%$, que $\omega_0^2 = 1/(LC)$, et en négligeant l'amortissement Γ . La fréquence de résonance s'écrit :

$$F_r = \frac{c}{2\pi W} \sqrt{\frac{e_C}{e_L \mu_{\text{ferro}} \varepsilon}} \quad (10)$$

où c désigne la vitesse de la lumière dans le vide. Dans le cas où les pertes magnétiques dans le film sont faibles à la fréquence de résonance F_r du métafilme, le maximum de perte est atteint à cette fréquence, et on a :

$$\mu''_{\text{meta}}(F_r) = \frac{\mu_{\text{ferro}}'^2}{\mu_{\text{ferro}}''} \quad (11)$$

Dans l'expérience, l'épaisseur e_C et la constante diélectrique ε de l'isolant sont mal connues, puisqu'il s'agit d'un empilement de mylar et de colle. En prenant $e_C/\varepsilon = 10,3 \mu\text{m}$, on trouve que la perméabilité mesurée que le métafilme est très bien décrite par les équations (7)–(9), ainsi que l'illustre la Fig. 5(b). On dispose donc à travers du modèle présenté ici d'un outil à la fois simple et très performant pour concevoir des métafilms présentant des propriétés particulières. On voit sur la Fig. 5(b) que la perméabilité d'un métamatériau qui combine un constituant magnétique et un motif inductif peut être très différente de celle de chacun de ces constituants, en comparant la Fig. 5(b) à la Fig. 3(b). Enfin, il est envisageable de réaliser des métafilms magnétiques à l'aide des technologies planaires de dépôt, gravure et remplissage de vias, maîtrisées par les industriels de la microélectronique, comme l'illustre la Fig. 5(c). Il s'agit à notre connaissance du seul type de métamatériau qui soit à la fois réalisable en technologie microélectronique planaire, apte à interagir avec un champ électromagnétique dans le plan, et fonctionnant à des fréquences inférieures à quelques GHz. Une étude plus détaillée sur ce nouveau type de métamatériau a été publiée récemment [38].

5.2. Métamatériaux constitués de fils magnétiques guipés

Une autre voie pour combiner les matériaux magnétiques doux et les motifs inductifs est la voie textile. Les micro-fils magnétiques amorphes gainés de verre sont des matériaux magnétiques doux qui présentent des niveaux élevés de perméabilité dans le domaine hyperfréquence [39]. La Fig. 6(a) permet de distinguer le cœur magnétique, et l'écorce de verre, qui assure des propriétés isolantes électriques. On peut utiliser des mèches de microfils amorphes comme noyau magnétique, et réaliser un motif inductif par guipage à l'aide d'un fil de cuivre. Le guipage est une technologie textile qui consiste à entourer une mèche d'un fil unique. Des métamatériaux textiles ont été réalisés selon ce procédé [35,40]. La Fig. 6(b) présente une partie d'un tel échantillon. On peut facilement ajuster la fréquence de résonance du métamatériau en choisissant le pas de guipage (Fig. 6(c)). Ces matériaux peuvent constituer des filtres performants pour des applications dans le domaine de la compatibilité électromagnétique [41].

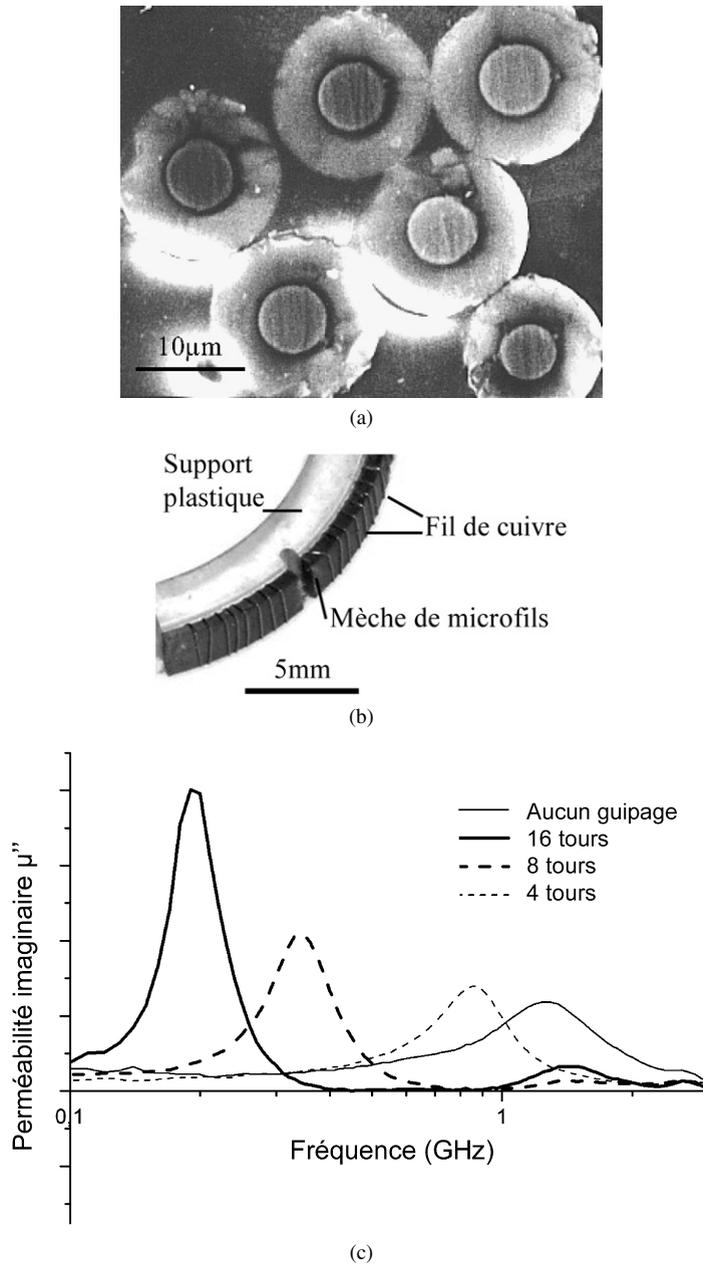


Fig. 6. (a) Micrographie d'un microfil magnétique doux gainé de verre; (b) photographie d'un métamatériau constitué de mèches de microfils magnétiques, guipé de plusieurs tours de fil de cuivre; (c) perméabilité imaginaire mesurée sur différents métamatériaux, présentant un nombre de tours fil de cuivre différents.

5.3. Matériaux magnétiques présentant une perméabilité commandable en tension

On sait depuis longtemps commander la perméabilité d'un matériau magnétique doux en lui appliquant un champ magnétique. Si ce pilotage est très pratique en laboratoire, il est totalement inapproprié pour des applications commerciales. La consommation électrique, le poids et le coût d'un électroaimant, même miniature, est en effet rédhibitoire pour bien des applications. Aussi, la commande de la perméabilité à l'aide d'une tension, et avec une consommation de puissance négligeable, présente un intérêt fort. Nous avons réalisé la première démonstration d'un élément magnétique commandable en tension, à l'aide d'une inclusion similaire à celle représentée sur la Fig. 2(f) [34]. Le résonateur

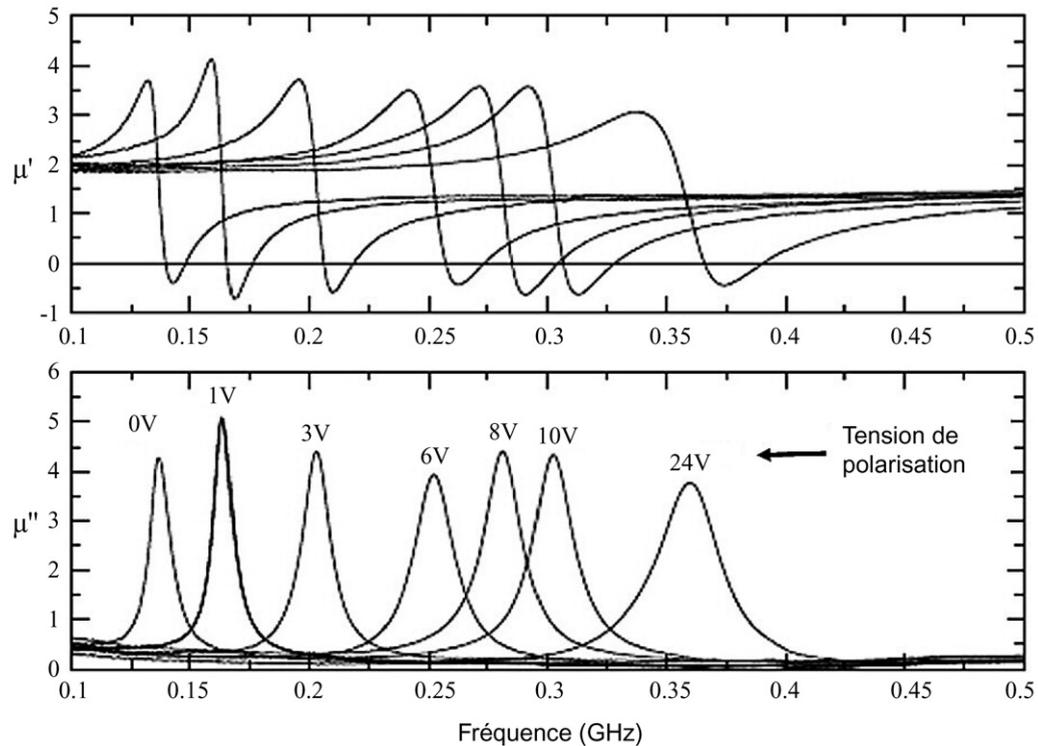


Fig. 7. Perméabilité d'un métamatériau accordable en tension, composé d'un noyau magnétique entouré d'un circuit inductif et d'une charge accordable en tension comportant un varactor.

inductif comporte un noyau magnétique. Il est connecté à une charge capacitive qui comprend un varactor, et dont on peut commander la capacité. La Fig. 7 représente la perméabilité obtenue pour différentes tensions de polarisation de la charge accordable. On constate que l'on parvient à accorder la fréquence de résonance sur plus d'une octave. Nous avons ainsi montré qu'il est possible de combiner la perméabilité élevée d'un matériau magnétique traditionnel, et la facilité d'une commande électronique [42].

5.4. Conducteurs hautes fréquences épais

Les conducteurs assurant les interconnexions hautes fréquences sur des circuits présentent des pertes dues à l'effet de peau qui deviennent gênantes à haute fréquence, en particulier lorsque la puissance à transmettre nécessite des conducteurs assez épais. Pour diminuer ces pertes, une équipe néerlandaise a proposé en 2004 une utilisation novatrice des matériaux magnétiques [14]. On sait bien décrire les pertes par effet de peau, et en particulier on sait qu'elles croissent lorsque la perméabilité μ du conducteur augmente. Aussi, la solution proposée est-elle de faire décroître la perméabilité du conducteur, en dessous de la valeur unité qui est la perméabilité des conducteurs non magnétiques usuels, en colaminant le conducteur avec de fines couches de matériau magnétique présentant une perméabilité négative (voir Fig. 3(a)).

6. Enjeux associés aux technologies et à la connaissance

Dans la compétition qui oppose les métamatériaux à base de cuivre et les matériaux magnétiques à base de fer, les questions de coût et de technologies ont une place importante. Certes, la perspective de remplacer de volumineux noyaux de métal ou de ferrite par de fins motifs de cuivre gravés paraît attrayante du point de vue du coût des approvisionnements. Cependant, si la réalisation de métamatériaux à l'aide des technologies issue de la fabrication des circuits imprimés est très pratique et versatile pour le laboratoire, l'assemblage des différents motifs est une tâche à la fois exigeante et difficile à automatiser. Dans le domaine des surfaces à haute impédance, les structures comportant

des champignons [30] sont actuellement handicapées par rapport à la voie rivale des surfaces sélectives en fréquences, du fait que les technologies matures ne permettent pas de réaliser de manière massivement collective de grands champs de champignons métallisés.

D'un autre côté, la construction de métamatériaux utilisant des composants à montage de surface, comme illustré sur la Fig. 4(b), est une solution maîtrisée industriellement et peu onéreuse. Différentes technologies permettent l'intégration d'inclusions inductives avec des matériaux magnétiques conventionnels, comme les métafilms magnétiques (Fig. 5(c)) et les métamatériaux en technologie textile (Fig. 6(b)) présentés dans cet article. L'utilisation d'inducteurs ferrites en technologie CMS associée aux technologies de report de ce type de composant, constitue une autre voie possible. L'association des matériaux magnétiques conventionnels et des motifs inductifs permet d'avoir à la fois des niveaux de perméabilité élevés, et une réponse en fréquence synthétisable facilement, en ajustant la géométrie des éléments inductifs et capacitifs. Un tel ajustement de la réponse magnétique hyperfréquence est généralement beaucoup plus simple qu'une optimisation du matériau magnétique.

L'engouement récent sur les métamatériaux est également utile pour diffuser une meilleure connaissance de ce que représente la perméabilité magnétique. Cette grandeur, considérée jusque là comme inutile en l'optique, ne constitue donc pas seulement une sophistication réservée à l'étude des matériaux magnétiques, mais une opportunité de maîtriser le rayonnement électromagnétique sur tout le spectre. Au travers des enseignants et des étudiants enthousiastes, les enjeux sont de disposer à la fois de futurs chercheurs et ingénieurs plus à l'aise dans la manipulation de cette quantité ; mais aussi de logiciels capables de décrire un milieu avec une perméabilité différente de l'unité, et permettant le calcul des paramètres effectifs en soutenant l'intuition du concepteur par des cartes des champs adaptées [43,44]. Voilà des raisons pour lesquelles l'intérêt actuel pour les métamatériaux est bénéfique pour la communauté du magnétisme hyperfréquence.

Dans nombre de cas, les métamatériaux peuvent être décrits soit comme des matériaux, soit comme des dipôles chargés. Les électroniciens et antennistes savent depuis longtemps décrire l'interaction du circuit de la Fig. 4(b) avec une onde incidente dans un formalisme qui leur est propre. Décrire une telle inclusion en lui associant une perméabilité est par contre une conquête beaucoup plus récente. La dualité entre la description familière au physicien des matériaux, et la description familière aux ingénieurs antennistes, peut constituer un lien utile entre les communautés. Ce peut être aussi un outil très puissant pour concevoir des matériaux intégrant des fonctions électroniques. Là encore, l'élan créé autour des métamatériaux est bénéfique pour rapprocher les communautés.

7. Conclusion

Les travaux récents sur les métamatériaux ont établi que l'on peut assez simplement créer des matériaux qui présentent une perméabilité hyperfréquence résonante, par exemple au moyen de motifs cuivrés obtenus par gravure. Une perméabilité différente de l'unité n'est donc pas un attribut exclusif des matériaux à base de fer traditionnellement utilisés comme matériaux magnétiques hyperfréquence. Doit-on envisager que dans le domaine du magnétisme hyperfréquence, l'âge du cuivre succède à l'âge du fer ? Sans doute pas, car nous avons montré que les niveaux de perméabilité associés aux motifs cuivrés étaient limités pour des raisons fondamentales. Dans quelques cas particuliers, les métamatériaux peuvent sans doute remplacer avantageusement les matériaux magnétiques : nous avons donné l'exemple des étalons de perméabilité, et des matériaux à perméabilité élevée à très haute fréquence. Dans d'autres cas, c'est l'alliance de matériaux magnétiques à base de fer et de motifs à base de cuivre qui laisse entrevoir des métamatériaux combinant les avantages de ses deux constituants. Enfin, un autre apport essentiel de la communauté des métamatériaux est de proposer une description élégante de matériaux complexes, et de diffuser largement cette vision.

Remerciements

Je remercie A.L. Adenot-Engelvin, S. Dubourg, F. Duverger, M. Ledieu, J.-H. Le Gallou et N. Mallejac pour de nombreux échanges et discussions.

Références

- [1] J.B. Pendry, A.J. Holden, D.J. Robbins, W.J. Stewart, *IEEE Trans. MTT* 47 (1999) 2075.

- [2] L. Lewin, Proc. Inst. Electr. Eng. 94 (1947) 65.
- [3] O. Acher, J. Magn. Magn. Mater., doi:10.1016/j.jmmm.2008.10.035.
- [4] G. Veselago, E.E. Narimanov, Nature Materials 5 (2006) 759.
- [5] <http://www.ee.duke.edu/~drsmith>.
- [6] C.A. Graimes, P.L. Trouilloud, R.M. Walser, IEEE Trans. Magn. 24 (1988) 603.
- [7] I.J. Jeong, A.P. Valanju, R.M. Walser, J. Appl. Phys. 64 (1988) 5679.
- [8] P.M. Valanju, R.M. Walser, A.P. Valanju, Phys. Rev. Lett. 88 (2002) 187401.
- [9] A.N. Lagarkov, V.N. Semenenko, V.A. Chistyayev, D.E. Ryabov, S.A. Tretyakov, C.R. Simovski, Electromagnetics 17 (1997) 213.
- [10] A.N. Lagarkov, V.N. Semenenko, V.N. Kisel, V.A. Chistyayev, J. Magn. Magn. Mater. 258 (2003) 161.
- [11] B.I. Popa, S.A. Cummer, Phys. Rev. Lett. 100 (2008) 207401.
- [12] O. Acher, J.-H. Le Gallou, M. Ledieu, Metamaterials 2 (2008) 18.
- [13] G. Perrin, J.C. Peuzin, O. Acher, J. Appl. Phys. 81 (1997) 5166.
- [14] P.K. Amiri, B. Rejaei, Y. Zhuang, M. Vroubel, J.N.L. Burghartz, IEEE Trans. Magn. 43 (2007) 2630.
- [15] M. Yamaguchi, Private communication.
- [16] A.N. Lagarkov, K.N. Rozanov, J. Magn. Magn. Mater., doi:10.1016/j.jmmm.2008.08.099.
- [17] M.C.K. Wiltshire, J.V. Hajnal, J.B. Pendry, D.J. Edwards, C.J. Stevens, Opt. Express 11 (2003) 709.
- [18] T. Driscoll, D.N. Basov, W.J. Padillo, J.J. Mock, D.R. Smith, Phys. Rev. B 75 (2007) 115114.
- [19] D. Maystre, S. Enoch, J. Opt. Soc. Am. A 21 (2004) 121.
- [20] J.-M. Lerat, N. Malléjac, O. Acher, J. Appl. Phys. 100 (2006) 084908.
- [21] O. Acher, O. Reynet, N. Mallejac, J.-M. Lerat, in: SPIE, Bellingham, Proc. SPIE 5359 (2004) 76–88, doi:10.1117/12.518153.
- [22] O. Acher, A.L. Adenot, Phys. Rev. B 62 (2000) 11324.
- [23] D. Lippens, C.R. Physique 9 (2008) 184.
- [24] K.N. Rozanov, IEEE Trans. Antennas and Propagation 48 (2000) 1230.
- [25] C.R. Brewitt Taylor, IET Microwaves Antennas and Propagation 1 (2007) 255.
- [26] S.A. Tretyakov, Microwave Opt. Technol. Lett. 31 (2001) 163.
- [27] S.A. Tretyakov, S.I. Maslovski, IEEE Antennas and Propagation 49 (2007) 37.
- [28] K.N. Rozanov, E.A. Preobrazhenskii, J. Comm. Tech. Electron. 50 (2005) 787.
- [29] D. Sievenpiper, L. Zhang, R.F. Jimenez Broas, N.G. Alexopolous, E. Yablonovitch, IEEE Trans. MTT 47 (1999) 2059.
- [30] D. Sievenpiper, J. Schaffner, R. Loo, G. Tagonan, S. Ontiveros, R. Harold, IEEE Trans. MTT 5 (2002) 384.
- [31] C.R. Simovski, P. de Maagt, I.V. Melchakova, IEEE Trans. Antennas and Propagation 53 (2005) 908.
- [32] M. Ledieu, O. Acher, IEEE Trans. Magn. Mat., in press.
- [33] O. Acher, M. Ledieu, A. Bardaine, F. Levassort, Appl. Phys. Lett. 93 (2008) 032501.
- [34] O. Reynet, O. Acher, Appl. Phys. Lett. 84 (2004) 1198.
- [35] A.L. Adenot-Engelvin, C. Dudek, O. Acher, J. Magn. Magn. Mater. 300 (2006) 33.
- [36] A.L. Adenot-Engelvin, C. Dudek, P. Toneguzzo, O. Acher, J. Eur. Ceram. Soc. 27 (2007) 1029.
- [37] M. Ledieu, O. Acher, J. Magn. Magn. Mater. 258 (2003) 144.
- [38] O. Acher, J. Magn. Magn. Mater. 320 (2008) 3276.
- [39] A. L. Adenot-Engelvin, C. Dudek, F. Bertin, O. Acher, J. Magn. Magn. Mater. 316 (2007) E831.
- [40] C. Dudek, A.-L. Adenot, F. Duverger, O. Acher, Proc. SPIE 5732 (2005) 470, doi:10.1117/12.582703.
- [41] A.L. Adenot-Engelvin, O. Reynet, O. Acher, Patent WO/2005/006828, 2005.
- [42] I. Gil, J.G. Garcia, J. Bonache, F. Martin, M. Sorolla, R. Marques, Electron. Lett. 40 (2004) 1347.
- [43] O. Acher, J.-M. Lerat, N. Malléjac, Opt. Express 15 (2007) 1096.
- [44] O. Acher, A.-L. Adenot, F. Duverger, Phys. Rev. B 62 (2000) 13748.