

# Comité National Français de Radioélectricité Scientifique

Section française de l'

## Union Radio Scientifique Internationale

Siège social : Académie des Sciences, Quai de Conti – Paris



**JOURNÉES SCIENTIFIQUES DU CNFRS**

**" NANOSCIENCES ET RADIOÉLECTRICITÉ "**

**PARIS, LES 20 ET 21 MARS 2007**

---

### **Métamatériau main gauche asymétrique en micro-onde et en infrarouge en incidence normale.**

---

**B. KANTE\*, S. N. BUROKUR, F. GADOT, A. De LUSTRAC**

*IEF (Institut d'Électronique Fondamentale) Université Paris sud, Bât 220, 91405 Orsay Cedex*

*\*boubacar.kante@ief.u-psud.fr*

#### **Résumé**

Nous avons récemment fabriqué à l'IEF (Institut d'Électronique Fondamentale) un métamatériau main gauche fonctionnant dans le proche infrarouge. Ce prototype présente un indice de réfraction négatif autour de deux fréquences correspondant aux deux premières résonances plasmoniques de la structure à 60 THZ et 140 THZ. Après une présentation du prototype réalisé et des principaux résultats obtenus, nous proposons d'unifier les deux approches utilisées dans la conception des métamatériaux à indice de réfraction négatif, en micro-onde et en infra-rouge, en proposant une structure asymétrique monocouche formées de lignes continues et discontinues, fonctionnant en incidence normale. Nous discutons l'influence des transformations topologiques sur le comportement main gauche.

Mots clés: Métamatériau; matériau main gauche; matériau doublement négatif; Indice de réfraction négatif.

#### **Summary**

We have recently fabricated at IEF (Institut d'Electronique Fondamentale) a left handed metamaterial working in the near infrared. The prototype has a negative index of refraction around two frequencies identified to be the first and the second plasmonic resonances of the entire structure at 60 THZ and 140 THZ. We first present the realized structure and the main calculated and experimental results. Then we propose to unify the two approaches of the design of the negative index metamaterials, in the microwave domain and in the infra-red one, with an asymmetric monolayer structure made from continuous and discontinuous metallic lines, working under a normal incidence. We discuss the impact of the topological transformations on the left-handed behaviour of the structure.

*Key Words : Metamaterial ; Left handed metamaterial; Double negative material; Negative refraction index.*

---

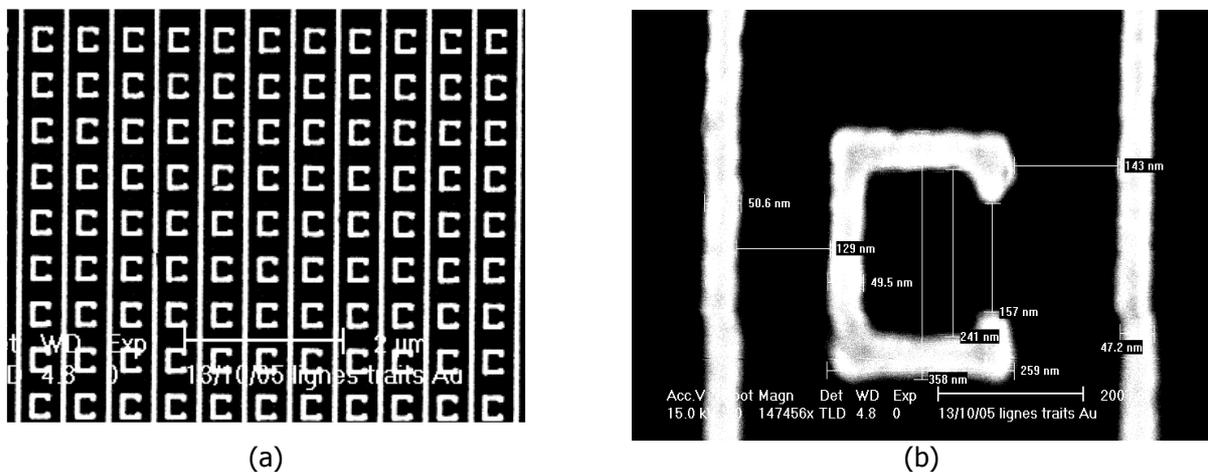
#### **Introduction**

Les matériaux ayant à la fois une perméabilité magnétique et une permittivité diélectrique négatives ont été étudiés en 1968 par V. Veselago [1]. A cette époque cette étude n'a suscité que peu d'intérêt tant les résultats semblaient théoriques. La démonstration par J. Pendry [2] de la possibilité de réaliser artificiellement de tels matériaux et leur première réalisation par Smith *et al.* [3] ont entraîné des efforts considérables de la communauté scientifique afin de comprendre et de réaliser ces nouvelles structures. Si elles étaient fabriquées, elles permettraient en effet de fabriquer des super- lentilles avec des résolutions ultimes [4] bien en dessous de la limite de Rayleigh. Plusieurs techniques ont été proposées pour réaliser ces matériaux. La première consiste à alterner les résonateurs en anneaux fendus et des lignes métalliques continues. C'est l'approche suivie par D.R. Smith. La deuxième approche consiste à utiliser des structures bi-couches formées de fils métalliques discontinus suivant la proposition de Zhang et Shalaev [5,6]. Dans ce manuscrit, nous présentons dans un premier temps le prototype réalisé à l'IEF fonctionnant dans le proche infrarouge et les résultats de simulation et de mesure obtenus. Dans un second temps, nous comparons ce

matériau à un métamatériau bi-couche proposé par Ozbay *et al*/en micro-onde, que nous proposons de faire évoluer vers une structure monocouche en infrarouge [6]. Cette structure monocouche coïncide avec notre structure lorsque les résonateurs voient leurs côtés latéraux s’annuler. Elle présente plusieurs avantages sur les structures déjà publiées. Elle fonctionne en incidence normale et présente une relative facilité de réalisation en infra-rouge. La simplicité de sa structure permet d’espérer la réaliser dans le domaine du visible.

### 1. Matériau à indice de réfraction négatif dans le proche infrarouge en incidence normale.

Les métamatériaux sont des structures artificielles dont les dimensions sont beaucoup plus petites que la longueur d’onde. Ces dimensions sont typiquement de l’ordre de  $\lambda/10$  où  $\lambda$  est la longueur d’onde se propageant dans le matériau. Cette condition permet de décrire le comportement de l’onde à partir des paramètres effectifs du matériau dans lequel il se propage et montre bien les difficultés technologiques quand la fréquence augmente. A  $2 \mu\text{m}$  les dimensions seront de typiquement de l’ordre de  $200 \text{ nm}$ . Nous avons récemment fabriqué un métamatériau constitué de résonateurs à anneaux fendus et de fils continus présentant une permittivité et une perméabilité simultanément négatives aux alentours de  $6 \mu\text{m}$  et  $2 \mu\text{m}$ . Ce matériau est le premier utilisant des fils et des résonateurs à anneaux fendus en incidence normale à présenter un caractère main gauche dans le proche infrarouge (150 THZ). La figure ci-dessous représente une image MEB (Microscope Electronique à Balayage) de la structure fabriquée. Les motifs élémentaires ont une périodicité de l’ordre de  $570 \text{ nm}$ . Les fils d’or ont une épaisseur de  $20 \text{ nm}$  et une largeur de  $50 \text{ nm}$ . Les dimensions d’un anneau sont  $250 \text{ nm} * 300 \text{ nm}$  avec une coupure de  $160 \text{ nm}$ .



**Figure 1** : Image MEB (Microscope électronique à balayage) du matériau main gauche fonctionnant à  $2 \mu\text{m}$  (a), image agrandie d’une cellule élémentaire du matériau montrant les dimensions des lignes et de l’anneau central (b).

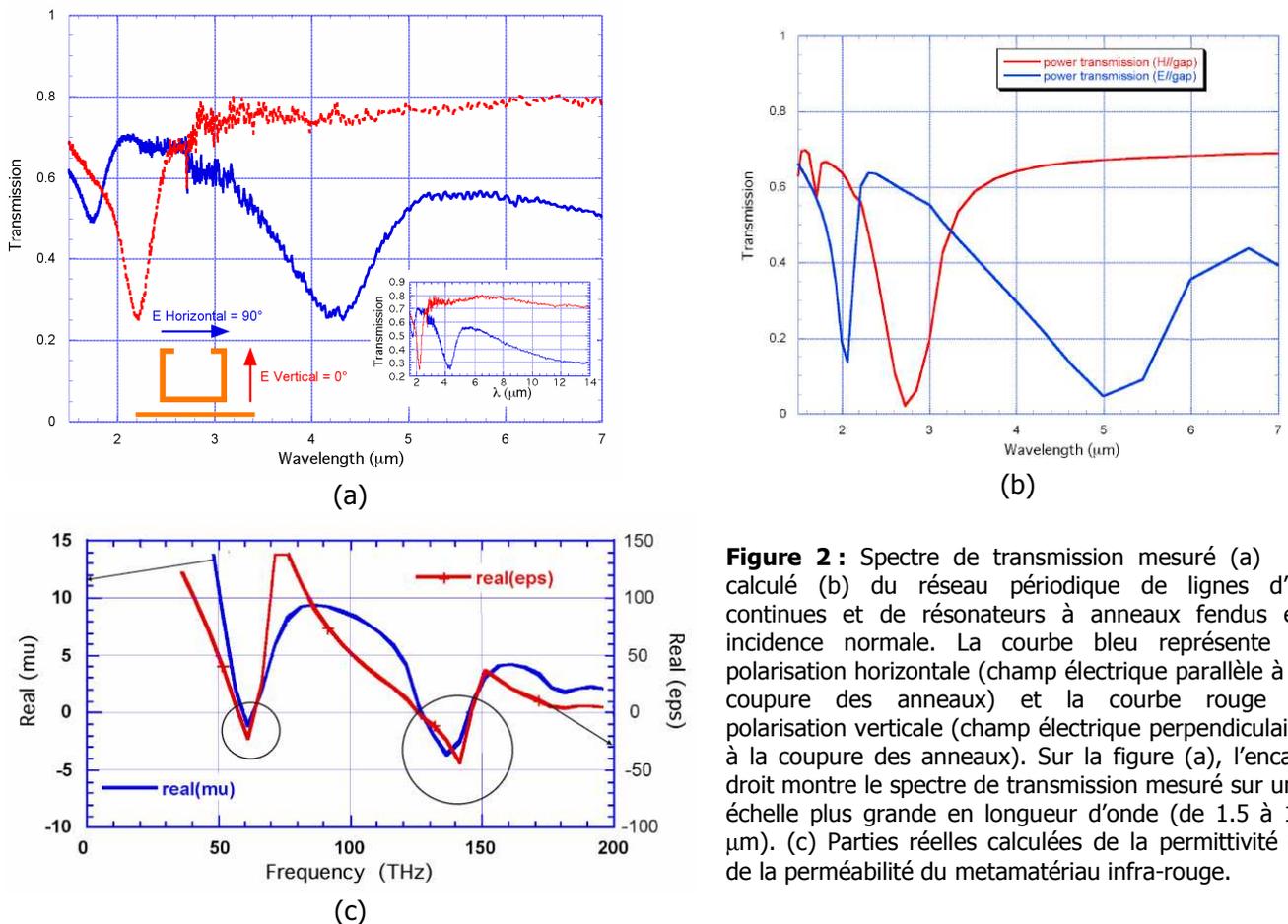
### 2. Résultat expérimentaux, modélisation et simulation

Nous avons simulé à l’aide du logiciel commercial HFSS d’Ansoft la structure bi-périodique infinie dans les directions latérales et en incidence normale. La figure 2a montre les résultats de mesures de transmission en incidence normale pour deux polarisations (champ E parallèle ou perpendiculaire à la coupure des anneaux) effectuées avec un FTIR (Spectromètre à Transformée de Fourier en Infra-Rouge). Ces résultats sont en bon accord avec les résultats de simulations numériques (figure 2b). Il faut noter que pour les simulations des matériaux métalliques dans HFSS nous avons utilisé un modèle de Drude pour représenter la permittivité de l’or. Ce modèle est défini par l’expression suivante :

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\omega_c)}$$

Les paramètres  $\omega_p$  et  $\omega_c$  sont respectivement les pulsations plasma et de collision de l’or [5]. Les valeurs utilisées ici sont les suivantes :  $\omega_p = 20.10^{16} \text{ s}^{-1}$  et  $\omega_c = 6.478 \cdot 10^{13} \text{ s}^{-1}$ . Dans les deux cas, simulations et mesure, on observe lorsque la polarisation est parallèle à la coupure des anneaux deux résonances, à  $1,7$  et à  $4,2$  microns (en mesure) et à  $2$  et à  $5,1$  microns en simulation. Ces résonances ont été identifiées par Rockstuhl *et al.* [8] comme des résonances plasmons. L’écart entre les mesures et les simulations provient sans doute des valeurs des paramètres du modèle de Drude qui représentent la permittivité de l’or. Lorsque la polarisation est perpendiculaire à la coupure des anneaux, ces deux résonances sont remplacées par une seule résonance, également d’origine plasmonique. La position de ces différentes résonances est fonction des paramètres géométriques et électromagnétiques du matériau et du substrat. Nous avons calculé également les paramètres effectifs du matériau en infra-rouge en utilisant l’approche de Nicholson et Ross

[9]. La figure 2c montre les résultats obtenus. La perméabilité et la permittivité deviennent négatives au voisinage des deux résonances plasmons, à 60 et 140THz.

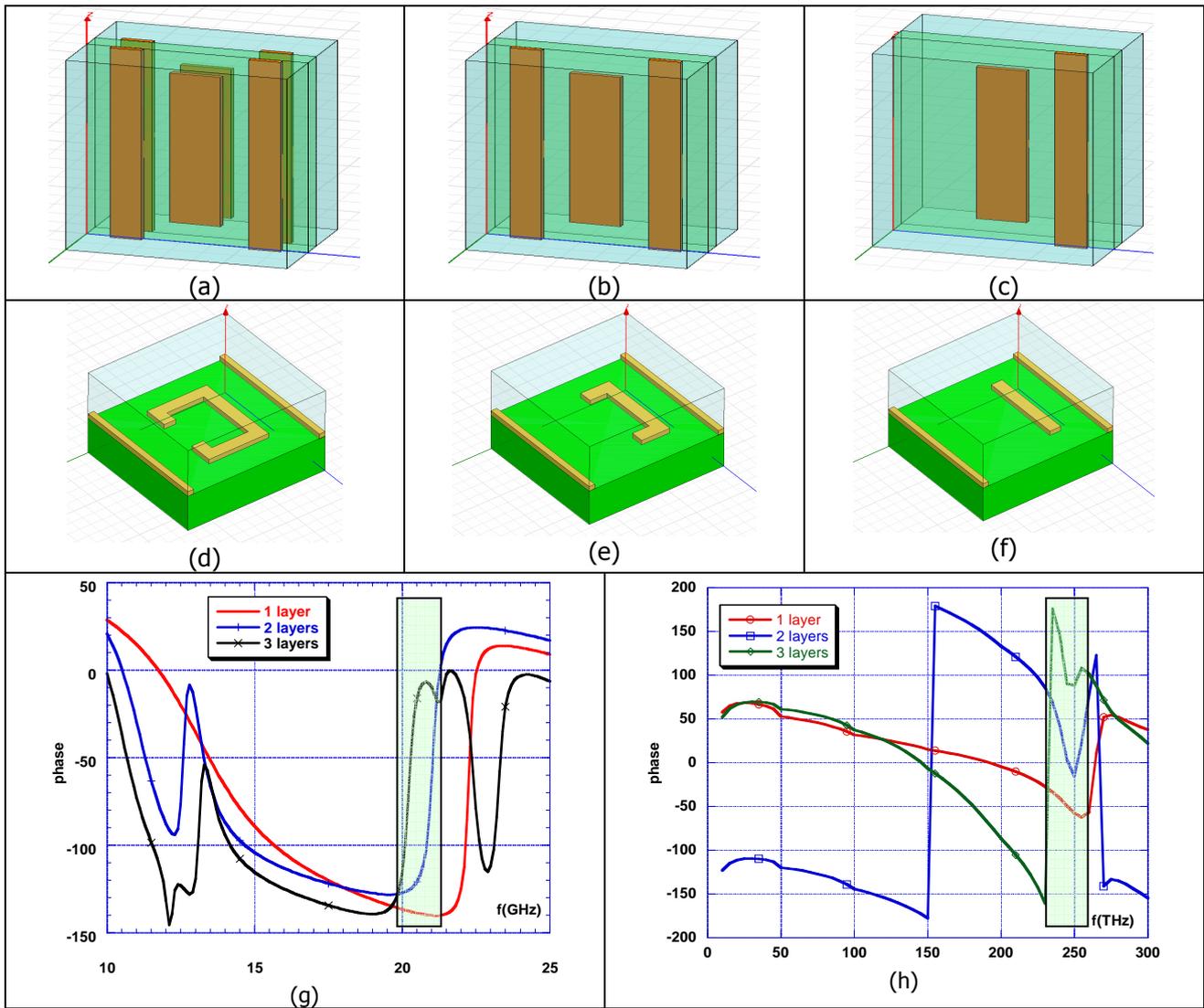


**Figure 2 :** Spectre de transmission mesuré (a) et calculé (b) du réseau périodique de lignes d'or continues et de résonateurs à anneaux fendus en incidence normale. La courbe bleu représente la polarisation horizontale (champ électrique parallèle à la coupe des anneaux) et la courbe rouge la polarisation verticale (champ électrique perpendiculaire à la coupe des anneaux). Sur la figure (a), l'encart droit montre le spectre de transmission mesuré sur une échelle plus grande en longueur d'onde (de 1.5 à 14  $\mu\text{m}$ ). (c) Parties réelles calculées de la permittivité et de la perméabilité du métamatériau infra-rouge.

### 3. Matériau main gauche asymétrique pour l'infrarouge.

Ozbay *et al* ont proposé dans le domaine micro-onde (14 GHz) un métamatériau main gauche bi-couche formé de lignes métalliques continues et discontinues en regard sur les deux faces d'un substrat (fig. 3a) [7]. Les lignes continues permettent d'avoir une permittivité négative pour des fréquences inférieures à leur fréquence plasma. Les lignes discontinues en regard constituent un circuit LC. Ces lignes discontinues superposées permettent d'obtenir une perméabilité magnétique négative autour de la fréquence de résonance du circuit LC en incidence normale. Dans la suite, nous avons transposé cette structure en supprimant la couche métallique arrière et un des deux fils continus latéraux. La figure 3c montre la cellule élémentaire de la nouvelle structure proposée. Les figures 3a, b, c montrent l'évolution de la structure initiale d'Ozbay vers cette structure finale. Les dimensions utilisées sont les mêmes que dans la structure initiale. Nous avons effectué également la même transposition pour notre structure infra-rouge (fig. 3d, e, f). Les dimensions utilisées les mêmes que pour la structure initiale à la différence que les cotés latéraux du résonateur central ont disparu. On peut observer que les deux motifs finaux c et f sont morphologiquement identiques, bien que l'une fonctionne en micro-onde et l'autre en infra-rouge. Pour étudier le comportement « main gauche » de ces structures nous les avons simulé à l'aide de HFSS, en utilisant pour la structure infra-rouge le modèle de Drude de l'or évoqué ci-dessus, et en supprimant le substrat de silicium et en le remplaçant par une épaisseur de 150nm de vide. Ozbay a montré théoriquement et expérimentalement que l'une des propriétés fondamentales d'un matériau main gauche concernait l'évolution de la phase du coefficient de transmission lorsque l'onde électromagnétique le traversait [8]. Cette phase augmente algébriquement lorsqu'on empile plusieurs couches dans le sens de propagation de l'onde, au lieu de décroître comme dans un matériau ordinaire « à main droite ». Dans la suite, nous utilisons ce test pour identifier les zones de fréquence présentant un indice de réfraction négatif. Nous avons donc simulé les structures des figures 3c et f en utilisant successivement 1, 2 et 3 couches superposées. Dans tous les cas la polarisation du champ électrique est parallèle aux fils métalliques et l'incidence de l'onde est normale. Le matériau est considéré comme infini dans les deux directions transversales à la direction de propagation de l'onde. Les figures 3h et 3g représentent les deux courbes de phase du coefficient de transmission de la structure dérivée de celle d'Ozbay en micro-onde (fig. 3c), et de celle de la structure dérivée en infra-rouge

(fig. 3f). Dans les deux cas une zone de comportement « main gauche » apparaît, autour de 21GHz pour la première, et de 250THz pour la deuxième, surlignée par des zones grisées.



**Figure 3 :** les 3 structures d’Ozbay simulées en micro-onde (a, b et c), et les trois structures en infra-rouge (d, e et f). (g et h) courbes de phase du coefficient de transmission pour la structure dérivée de celle d’Ozbay en micro-onde et pour celle de la structure dérivée en infra-rouge. Dans les deux cas une zone de comportement « main gauche » apparaît, autour de 21GHz pour la première, et de 250THz pour la deuxième, surlignée par les zones grisées.

## Conclusion

Nous avons fabriqué et caractérisé en incidence normale un métamatériau main gauche fonctionnant à  $2\ \mu\text{m}$  (proche infrarouge) constitué de fils continus et de résonateurs à anneaux fendus sur silicium. Le matériau réalisé présente un caractère main gauche pour une polarisation du champ E parallèle à la coupure de l’anneau. L’évolution de cette structure vers un réseau périodique et asymétrique par suppression des bras de l’anneau conserve le caractère « gaucher » et coïncide avec les transformations de la structure bicouche symétrique proposée par Ozbay *et al.* lorsque cette dernière se réduit à une structure monocouche asymétrique.

## Références bibliographiques

- [1] V. G. Veselago, “The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of permittivity and permeability”. *Sov. Phys. Usp.* 10, 509- 514 (1968).
- [2] J. B. Pendry, A. J. Holden, W.J. Stewart, “Magnetism from conductors and enhanced nonlinear phenomena,” *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 47, 2075 (1999).
- [3] D. R. Smith, *et al.*, “Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity”. *Phys Rev Lett* 84, 4184-4187 (2000).
- [4] J. B. Pendry, “Negative refraction makes a perfect lens”, *Phys. Rev. Lett.* **85** 3966, 2000.

- [5] Shalaev, V. M., Cai, W., Chettiar, U. K., Yuan, H.-K., Sarychev, A. K., Drachev, V.P. and Kildishev, A.V., *Opt. Lett.* **30** 3356, 2005.
- [6] Shuang Zhang, Wenjun fan, N. C. Panoiu, K. J. Malloy, R. M. Osgood, S. R. J. Brueck, "Demonstration of Near-Infrared Negative-Index Metamaterials," *Physical Review Letters* 95, 137404 (2005).
- [7] Kaan Guven, M. Deniz Caliskan, and Ekmel Ozbay, "Experimental observation of left-handed transmission in a bilayer metamaterial under normal- to- plane propagation", *Optics express* Vol. 14 N°. 19 (2006)
- [8] C. Rockstuhl, F. Lederer, "On the reinterpretation of resonances in split- ring- resonators at normal incidence", *Optics express* Vol. 14 N° 19 8827, 2006
- [9] K. Aydin, K. Guven, C. M. Soukoulis, and E. Ozbay, "Observation of negative refraction and negative phase velocity in left-handed metamaterials," *Appl. Phys. Lett.* **86**, 124102 (2005).