



HAL
open science

La réfraction des Matériaux : de Descartes à Harry Potter

Gilles Le Flem

► **To cite this version:**

Gilles Le Flem. La réfraction des Matériaux : de Descartes à Harry Potter. Séminaire ICMCB : "Cahiers du Chercheur", Mar 2007, Pessac, France. hal-00542150

HAL Id: hal-00542150

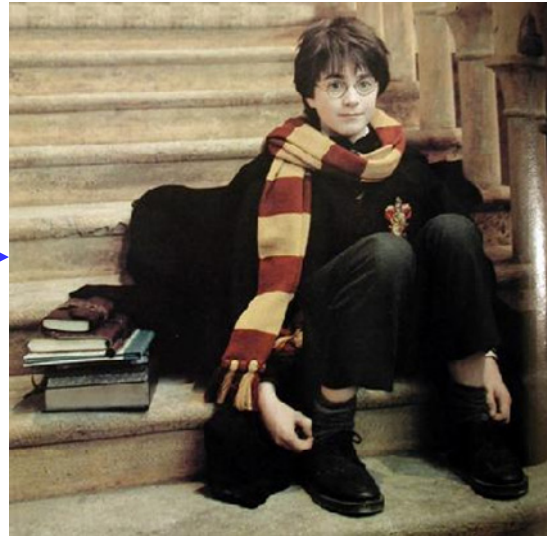
<https://hal.science/hal-00542150>

Submitted on 1 Dec 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

La réfraction des Matériaux : de Descartes à Harry Potter



Gilles Le Flem ICMCB (mars 2007)

La réfraction dans les matériaux : de Descartes à Harry Potter

(notes informelles et diapositives du séminaire de 16/03/07)

En juin 2006 le groupe de J. Pendry (Imperial Collège, Londres) montrait la possibilité – tout au moins sur le plan des concepts- d'exclure complètement les rayonnements électromagnétiques d'un volume déterminé soumis à une irradiation ce qui revient à dissimuler tout objet introduit dans ce volume. Cette publication (1) a été largement interprétée dans la « grande presse » comme le point de départ de la concrétisation du mythe de *l'homme invisible*, mythe largement entretenu de nos jours par exemple dans les aventures de *Harry Potter* ou dans des séries télévisées comme « *Star Trek* ». En novembre 2006 (2) le même groupe réalisait pour la première fois la dissimulation d'un objet (un cylindre de cuivre) à un rayonnement de fréquence micro onde par un matériau type métamatériau de Veselago. Dans ce contexte l'objectif de ce séminaire est de décrire, en restant sur le seul plan de la science des matériaux, les étapes qui ont conduit à la notion d'« *invisibilité* » en gardant comme fil conducteur la réfractivité des matériaux.

Le plan du séminaire est le suivant :

- 1) La structuration des indices de réfraction dans les matériaux,
- 2) La réfraction négative dans les cristaux photoniques,
- 3) Les métamatériaux de Veselago et leur place dans le diagramme perméabilité magnétique-permittivité électrique,
- 4) Les concepts actuels conduisant à l'invisibilité des objets à savoir : (i) le guidage d'un rayonnement autour de l'objet et (ii) la réduction, voire l'annulation, de la section efficace de diffusion du rayonnement arrivant sur l'objet.

1) De Descartes aux cristaux photoniques

L'indice de réfraction est le rapport de la vitesse de la lumière dans le vide et dans un milieu d'indice n . La réfractivité d'un rayonnement traversant la surface de deux milieux est interprétée classiquement par les lois de Snell- Descartes.

Les variations de l'indice de réfraction en fonction de la composition chimique s'analysent via l'équation de Clausius – Mossoti. Dans le cas des composés ioniques, on admet l'additivité des polarisabilités des cations et des anions. Pour des raisons évidentes la principale contribution est celle des ligands. Dans le cas particulier des oxydes l'augmentation des indices suit la séquence : composés ioniques, introduction d'ions d^0 (effet Jahn-Teller du 2^{ème} ordre), ions à paires libres.

Indices de réfraction de quelques oxydes

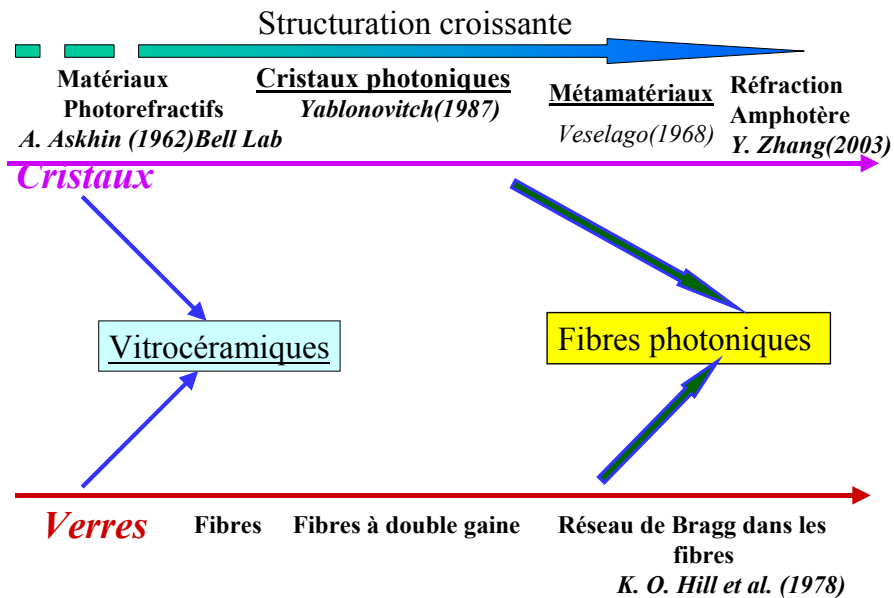
Composés	$n_d(x)$	$n_d(y)$	$n_d(z)$	
CaO	1,8936	1,8936	1,8936	} Liaisons ioniques
SrO	1,871	1,871	1,871	
BaO	1,984	1,984	1,984	
TiO ₂ (rutile)	2,619	2,619	2,9031	} Ions « d ⁰ » Effet J T de deuxième ordre
CaTiO ₃	2,407	2,407	2,407	
SrTiO ₃	2,414	2,414	2,414	
LiNbO ₃	2,3036	2,3036	2,2113	
KNbO ₃	2,2968	2,3504	2,1824	
Ba ₂ NaNb ₅ O ₁₅	2,3389	2,3376	2,2295	
LiTaO ₃	2,1859	2,1859	2,1902	
KTaO ₃	2,2425	2,2425	2,2425	} Ions à paires libres
TeO ₂	2,273	2,273	2,4288	
PbTiO ₃	2,79	2,79	2,79	
Bi ₂ O ₃ (α)	2,572	2,66	2,785	
Bi ₁₂ SiO ₂₀	2,561	2,561	2,561	

Toutes les données se rapportent à $\lambda = 589,3$ nm.

R. D. Shannon et al. *J. Phys. Chem Ref. Data* 31, n° 4, (2002) 931

Ce contexte a induit la création de matériaux dont les propriétés correspondent à une structuration des indices de réfraction pour aboutir à de réels matériaux composites . Les étapes les plus importantes sont les suivantes :

- la découverte des photo réfractifs (1962),
- l'implantation des réseaux de Bragg dans les fibres optiques (1978),
- l'élaboration des cristaux et fibres photoniques (1987),
- l'étude des méta matériaux pour l'optique (1995).
- la réfraction amphotère (2003).



La fonction optique devient dépendante de la structuration du matériaux

2) Les cristaux photoniques (CP) et la réfraction négative

2-1 Nature et élaborations des cristaux photoniques.

Les cristaux photoniques sont apparus en 1987 mais, dès 1887, Lord Rayleigh s'était interrogé sur la propagation de la lumière dans des cristaux maclés.

Dans un cristal photonique l'indice de réfraction varie périodiquement suivant une, deux ou trois directions de l'espace.

Trois caractéristiques doivent être immédiatement mentionnées :

- le contraste d'indice lié à la topologie,
- l'existence résultante de domaines d'énergie où la lumière ne peut se propager,
- l'introduction de défauts dans la périodicité permet de créer des « niveaux permis » dans la (les) bande(s) interdite(s) où le rayonnement de longueur d'onde correspondante pourra se propager.

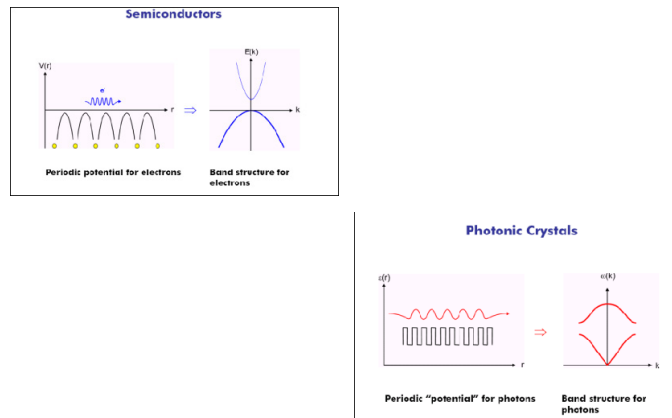
Par comparaison avec les semi conducteurs, la théorie des cristaux photoniques est fondée sur les considérations suivantes :

- les électrons sont des ondes,
- les ondes peuvent se propager dans un milieu périodique sans diffusion,
- l'existence d'une certaine analogie entre la résolution de l'équation de Schrödinger pour les électrons et des équations de Maxwell pour les photons d'où la construction de diagrammes d'énergie dans le formalisme des fonctions de Bloch. Les CP se distinguent des semi

conducteurs par deux différences remarquables : les particules ne sont pas chargées et il existe un contraste d'indice entre les phases constitutives.

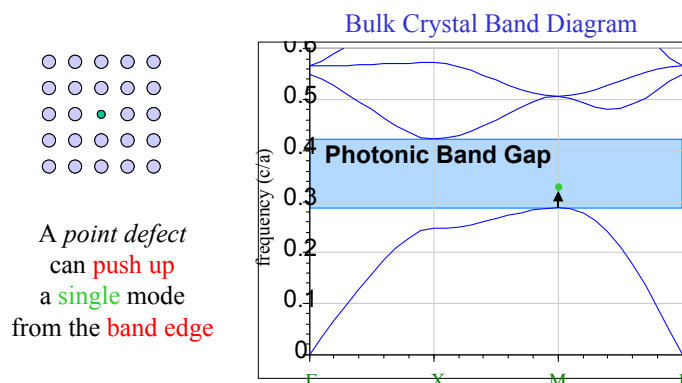
- les bandes interdites photoniques sont donc analogues aux bandes interdites dans les semi-conducteurs.

Electrons vs photons



En prenant l'exemple d'un réseau bidimensionnel, par exemple des cylindres d'un diélectrique dans l'air (Fig. 1), l'introduction d'un défaut – ici un cylindre de plus petite dimension – crée un niveau dans la bande interdite où la lumière de longueur d'onde correspondante pourra se propager.

Cavité mono mode



S.G. Johnson, MIT, Applied Physics Department

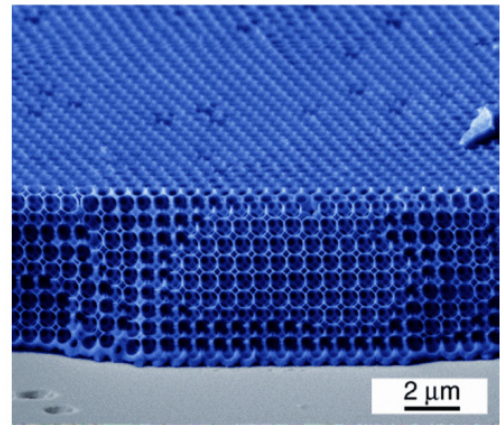
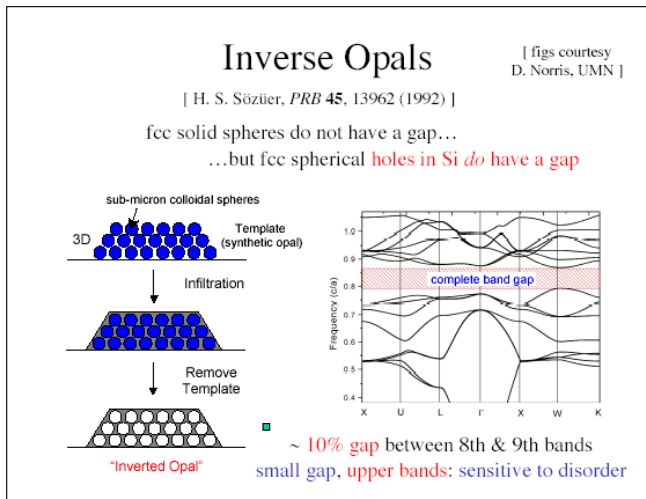
Figure 1 : Création d'une cavité monomode dans un cristal photonique bi dimensionnel.

Pour ce qui est des propriétés de réfraction il faudra tenir compte du détail de la forme des bandes à l'intérieur de la zone de Brillouin.

Rappelons qu'il existe deux méthodes d'élaboration des cristaux photoniques :

- la nanolithographie qui a l'avantage d'avoir été mise au point pour les semi-conducteurs et permet une architecture des défauts très précise. Elle a l'inconvénient d'être chère,
- l'auto assemblage de colloïdes, plus simple, plus rapide et moins chère mais moins souple pour la maîtrise de l'architecture du matériau. Par exemple, un assemblage de billes de silice est ordonné à partir d'une suspension dans le ménisque dans un liquide. Cet assemblage est infiltré par du silicium résultant du cracking d'un silane et la silice est ensuite dissoute dans une solution d'acide fluorhydrique ce qui conduit à un réseau périodique de silicium et d'air (Fig. 2a).

La figure 2 b montre que de cette manière peuvent être obtenus des matériaux présentant même deux systèmes de porosité.



[Y. A. Vlasov *et al.*, *Nature* **414**, 289 (2001).]

Figure 2a : Elaboration et diagramme de bande d'une Opale inverse.

Figure 2b : Cristal photonique à double porosité.

Les propriétés des cristaux photoniques dépendent de la dimensionnalité de l'ordonnement des indices de réfraction : miroirs de Bragg dans un système mono dimensionnel, guides d'onde dans un système bidimensionnel et piégeage de lumière dans un système 3D.

Exemple d'application : la propagation le long d'une ligne de défauts permet la formation de guides d'onde avec une très bonne transmission à 90° (Fig. 3) voire 180°.

Propagation along line defect

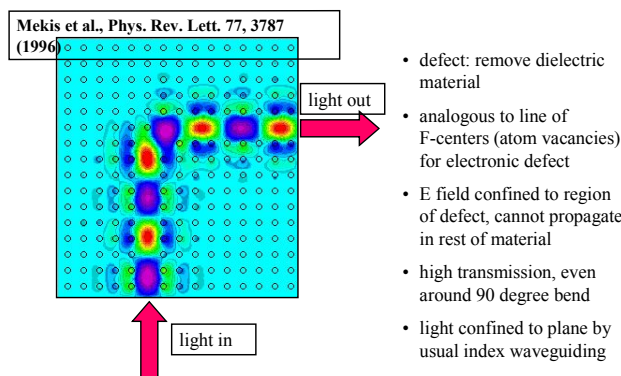


Figure 3 : Exemple de guide d'onde avec une courbure de 90°. *Le deuxième type d'exemple concerne les fibres photoniques.*

Les fibres photoniques dont le fonctionnement peut être compris comme un concept résultant de la réunion des modes de fonctionnement respectifs des fibres optiques et des cristaux photoniques. Elles sont préparées par étirement d'un assemblage de tubes creux et de tubes pleins donnant naissance à une série de canaux micrométriques disposés de façon périodique et parcourant toute la longueur de la fibre (Fig. 4a). Les propriétés, qui dépendent de la géométrie de cet assemblage et peuvent mettre en jeu des phénomènes d'optique non linéaires, sont très diverses : formation d'un continuum, propagation soliton etc.

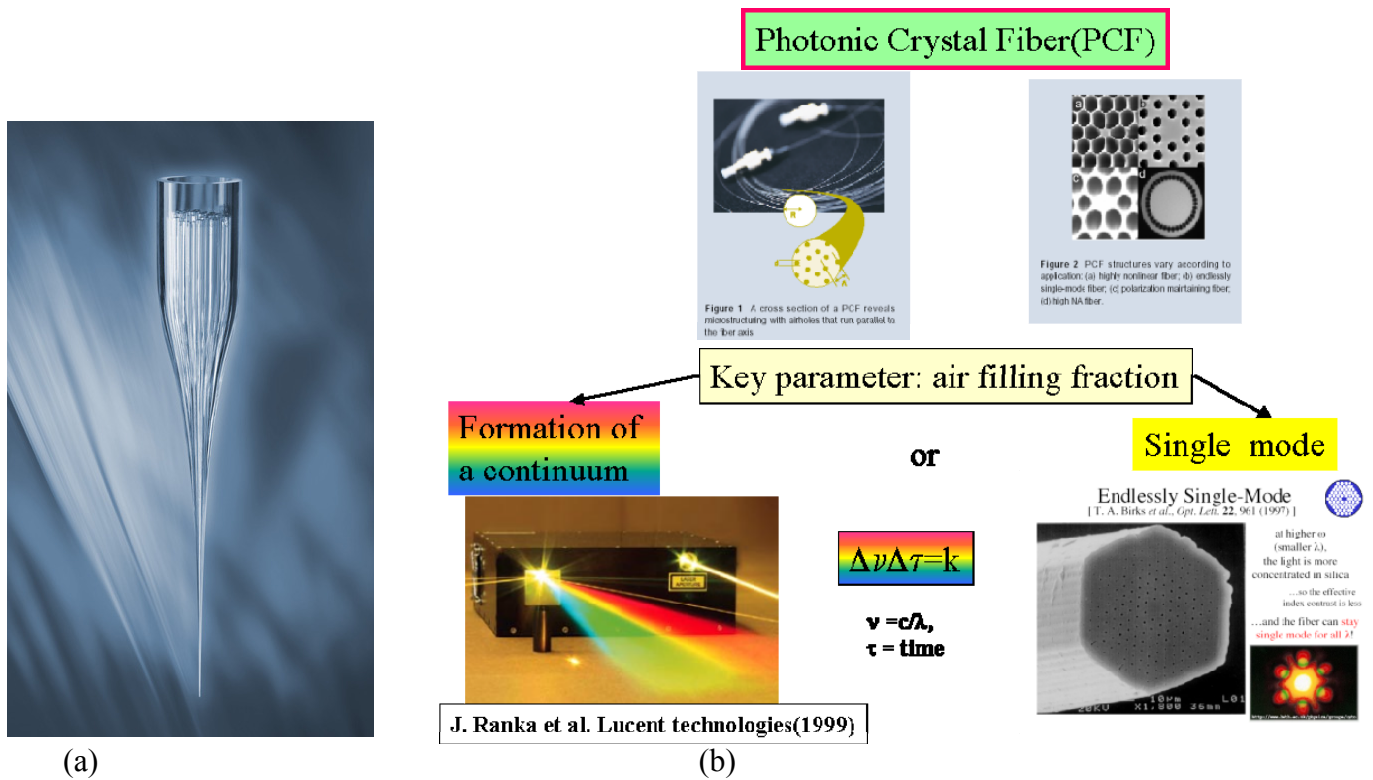


Figure 4(a) : Elaboration d'une fibre photonique.

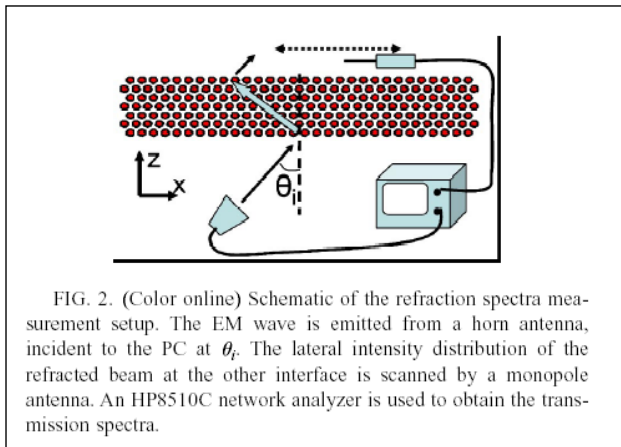
Figure 4(b) : Les propriétés d'une fibre photonique dépendent du mode d'assemblage des micro tubes.

2-2 Propagation d'un onde dans cristal photonique.

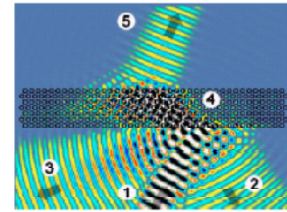
Une des propriétés importantes des cristaux photoniques est la notion de réfraction négative.

L'architecture d'un cristal photonique permet de modifier (de sculpter) le diagramme de structure de bande et par conséquent d'agir sur les conditions de propagation d'une onde électromagnétique ce qui conduit à de nouveaux phénomènes optiques par exemple la réfraction négative et le phénomène de « superprisme ».

Considérons un cristal photonique simple constitué de fils d'aluminium dans un réseau bidimensionnel (Fig5). L'intensité de la lumière réfractée est détectée sur l'autre face du cristal photonique. En ayant choisi un angle d'incidence approprié, la lumière transmise apparaît sur le coté « négatif » par rapport à la loi de Descartes (sur la figure 5 réfraction 4). Il en résulte des valeurs d'indices effectifs négatifs qui varient en fonction de l'angle d'incidence (direction du vecteur d'onde k) et de la fréquence du rayonnement ω .



Simulation de la propagation d'une onde dans un cristal photonique

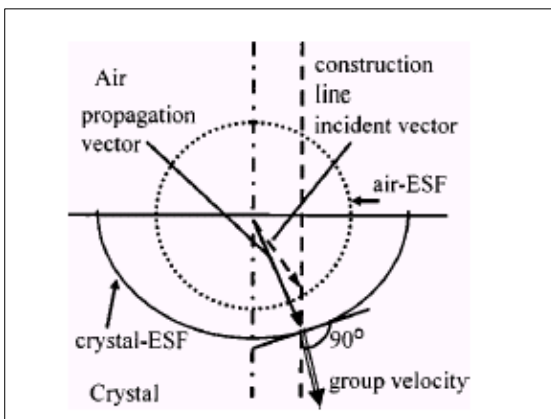


- 1 : rayon incident,
- 2 : réflexion à l'ordre 0,
- 3 : réflexions à des ordres supérieurs,
- 4 : réfraction
- 5 : transmission

K. Guven et al. *Phys Rev. B*70(2004) 205125

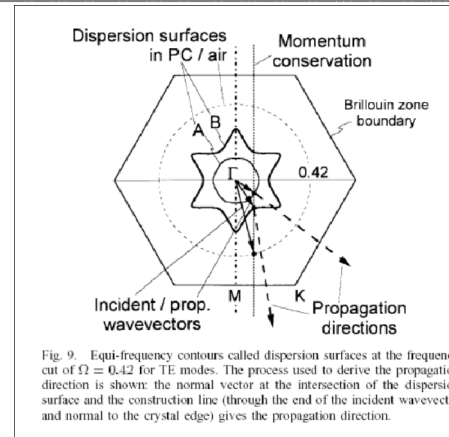
Figure 5 : Propagation d'une onde dans un cristal photonique (Expérimentation et simulation).

Les conditions de propagations sont liées à la forme des bandes du diagramme d'énergie. Pour obtenir la direction de propagation on considère la surface d'une bande à une fréquence déterminée (Fig. 6a) : la direction de propagation est normale à la surface de cette bande au point d'intersection avec la droite de conservation des moments. Dans la figure les courbes solides et en pointillées correspondent respectivement aux surfaces d'égale fréquence pour le cristal photonique et l'air. La ligne en pointillée correspond à la direction de la propagation incidente et la double ligne fléchée à la direction de la vitesse de groupe. Si la surface d'égale fréquence du cristal photonique présente des discontinuités – convexes ou concaves (Fig. 6b courbe B)- la direction de propagation peut être facilement modifiée d'où l'effet de super prisme.



(a)

Directions de propagation dans un Cristal photonique



(b)

Figure 6a : Construction de la direction d'un rayon réfracté (S. Xiong et al. (Osaka) *J. Appl. Phys.*, 94, n°2(2003) 1286).

Figure 6b : Exemple d'une surface d'égale fréquence présentant des points anguleux- courbe- les surfaces A et B de même énergie induisent des directions de réfraction très différentes pour la même incidence. (H. Kosaka et al. *J. Lightwave Tech.* 17, n° 11, (1999) 2032).

2-3 L'effet « superprisme ».

Considérons un cristal photonique formé de couches alternées de Si amorphe et de SiO₂ sur un substrat de Si et présentant une symétrie globale hexagonale P/6mm. Une caméra CCD au-dessus du cristal détecte le cheminement du rayonnement dans celui-ci. Dans un prisme constitué d'un tel cristal photonique (Fig. 7) la dispersion peut être 500 fois plus grande que dans un prisme avec un matériau conventionnel.

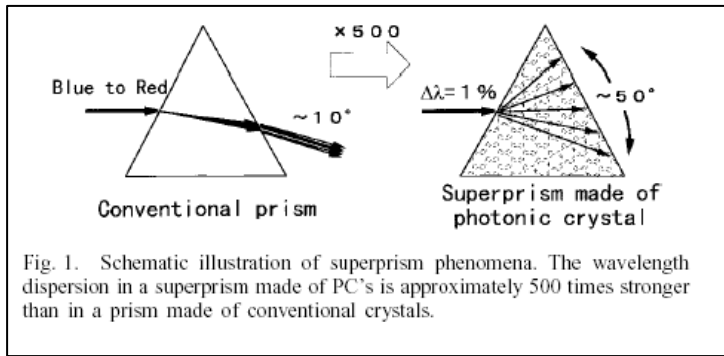


Fig. 1. Schematic illustration of superprism phenomena. The wavelength dispersion in a superprism made of PC's is approximately 500 times stronger than in a prism made of conventional crystals.

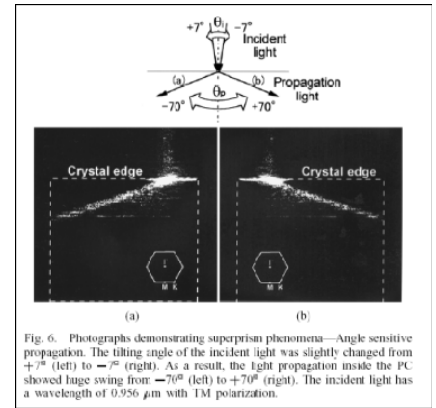


Fig. 6. Photographs demonstrating superprism phenomena—Angle sensitive propagation. The tilting angle of the incident light was slightly changed from $+7^\circ$ (left) to -7° (right). As a result, the light propagation inside the PC showed large swing from -70° (left) to $+70^\circ$ (right). The incident light has a wavelength of $0.956 \mu\text{m}$ with TM polarization.

Figure 7 : Effet de superprisme dans un cristal photonique (H. Kosaka et al. *J. Lightwave Tech.* 17, n° 11 , (1999) 2032).

Par exemple, pour une variation en longueur d'onde allant du bleu au rouge, l'angle de réfraction change de 10° dans un prisme « normal » tandis qu'une variation en longueur de 1% illuminant un prisme « photonique » génère une dispersion de 50° .

L'autre figure illustre le fait que, pour une illumination à $\lambda = 0.956 \mu\text{m}$ variant de $\pm 7^\circ$ par rapport à la normale, l'angle du rayon réfracté varie de $\pm 70^\circ$.

Toutes ces propriétés peuvent être expliquées par la structure de bande du CP.

L'une des applications de tels systèmes se trouve dans la mise au point de micro multiplexeurs - démultiplexeurs.

2-4 Phénomènes d'optique non linéaire dans les cristaux photoniques

Sous l'effet d'un rayonnement intense, de nouvelles fonctions optiques peuvent être créées en induisant des phénomènes d'optique non linéaire par exemple l'effet Kerr optique.

La modulation de l'angle de réfraction dépend de la variation de l'indice de réfraction produite par effet Kerr en mettant en jeu une technique de type pompe sonde.

Sous l'action du rayonnement « pompe » se produit une modification de l'indice (Fig. 8) et implicitement une modification du diagramme de bande photonique. L'angle d'incidence de la sonde et sa fréquence sont choisies pour que le vecteur d'onde du rayon réfracté s'oriente dans une direction où la surface de dispersion est très anisotrope. L'angle de réfraction peut être déterminé à partir d'une analyse des courbes de dispersion pour la fréquence de sonde ω_s en absence ou en présence de pompe ($P = 0$ et $P \neq 0$).

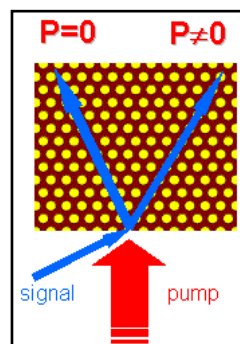


Figure 8 : Effet Kerr optique dans un cristal photonique mettant en jeu une expérience pompe-sonde.

Un autre exemple est celui de l'interrupteur optique (Fig.9). Un CP ayant l'architecture d'un réseau triangulaire est constitué d'un ferroélectrique type PLZT et d'air. Sous l'action de la « pompe » (ou d'un champ électrique externe) il y a ouverture d'un gap d'où réflexion de la lumière au lieu de sa propagation dans le cristal photonique.

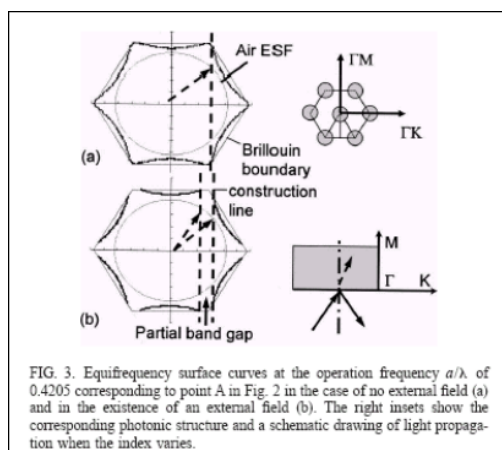
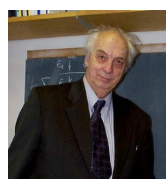
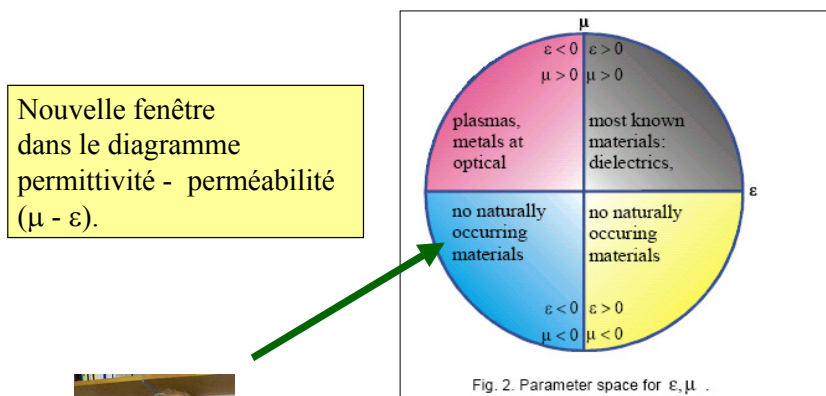


Figure 9 : Commutation optique dans un cristal photonique (S. Xiang et al. (Osaka) *J. Appl. Phys.*, 94, n°2(2003) 1286).

3 Les métamatériaux et le problème des indices de réfraction négatifs.

3-1 Une question de définition

En envisageant le diagramme permittivité électrique(ϵ) – perméabilité magnétique(μ), l’objectif va être la création de matériau dans une nouvelle fenêtre où ϵ et μ sont simultanément négatifs.



V. G. Veselago(1968)

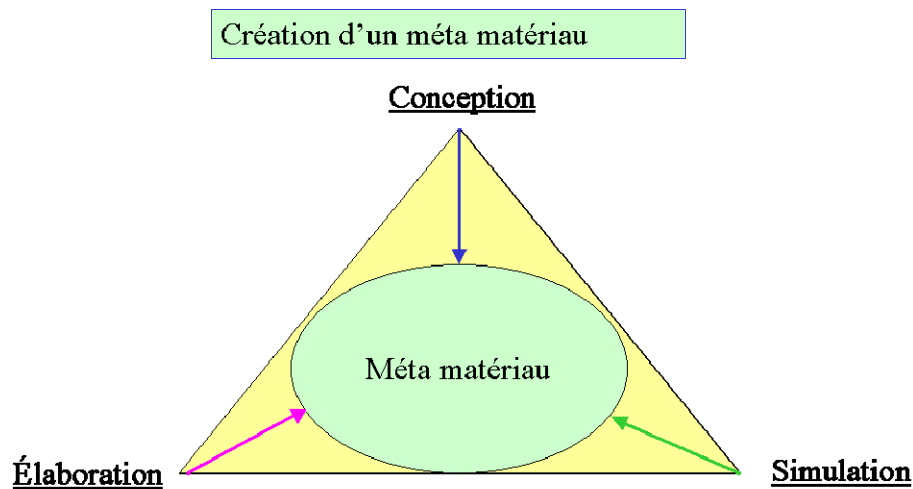
Au préalable il est nécessaire de bien définir le terme de métamatériau.

L’introduction de « méta » dans les termes scientifiques est ancienne : citons les métaphosphates dont l’un d’eux – par exemple- le métaphosphate d’adénosine, lorsqu’il se transforme en diphosphate, est une source d’énergie pour le travail mécanique d’un muscle. C’est un véritable matériau.

Le terme métamatériau a été récemment très discuté par A. Lakhtakia et al. dans OPN de janvier 2007 et dans le cadre du réseau « Métamorphose » animé par S. Tretyakov à Helsinki. En résumé un métamatériau est un composite qui présente des propriétés non observées par ses constituants ou qui exalte une des propriétés de l’un des constituants.

Les métamatériaux ne concernent pas uniquement le domaine de l'optique. Par exemple un composite magnétoélectrique est formé de couches alternées d'un piézoélectrique BaTiO₃ et d'un magnétostrictif le terfénol D[M. Avallaneda et al. J. Intelligent Materials Systems and Structures 5, n°4(1994)501]. D'une manière générale un métamatériau est le résultat d'une triple approche simultanée :

- la conception,
- la simulation,
- l'élaboration.



L'architecture est à l'origine des propriétés et des performances

L'architecture du composite est à l'origine des propriétés et des performances de tels matériaux.

3-2 Les métamatériaux pour l'optique

D'une manière générale un métamatériau sera un composite dont les composants ne réagissent pas entre eux dans les conditions d'emploi. Ses propriétés sont liées :

- à la nature des composants,
-
- à leur structuration : périodicité, géométrie propre (topologie), mode d'assemblage.

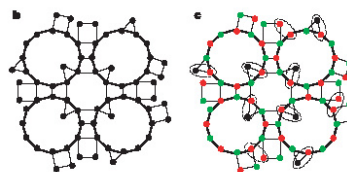


Figure 1 An illustration of topological versus chemical ordering in disordered network systems. **a.** A formation of skydivers helps to demonstrate disorder on an intermediate length scale²¹. Each diver has a simple set of rules for bonding to the next, but there is sufficient flexibility for different patterns of ordering to be created on the scale of a few body lengths. Photo from ref. 21 copyright Mike Skellington (www.akeff.com). **b.** The

Figure 10 Illustration de la réponse effective d'un système : la compétition de vol relatif se juge sur la qualité et l'amplitude etl'esthétique de la figure effectuée par les « sky divers ».

Soumis à un rayonnement électromagnétique, il se comporte comme un matériau *homogène* s'il est structuré par des motifs de dimensions entre 1/10 et 1/100 de la longueur d'onde incidente. Il en résulte une notion de réponse « effective » à l'excitation c'est à dire une réponse de l'ensemble du composite et non de la somme de ses composants par exemple $n_{\text{eff.}}$, $\epsilon_{\text{eff.}}$, $\mu_{\text{eff.}}$.

Cette notion de réponse effective peut être illustrée dans un exemple tiré de disciplines sportives –ici le vol relatif-(Fig. 10) où l'on considère la performance d'un ensemble plutôt que celle des individualités.

Ainsi un métamatériau sera caractérisé par une ou des dimension(s) « a » que certains appellent la maille élémentaire. La réponse de cette structure à une radiation électromagnétique de fréquence ω implique $a \ll \lambda = 2\pi c_0 \omega^{-1}$ (c_0 = vitesse de la lumière).

Pour préciser ces paramètres, un métamatériau fonctionne dans le domaine du GHz si $a < 10^{-2}$ m et dans le domaine du THz si $a < 10^{-6}$ m. Actuellement le domaine de fonctionnement des métamatériaux s'étend jusqu'à une région proche du visible (780nm, 370 THz) (Fig. 12).

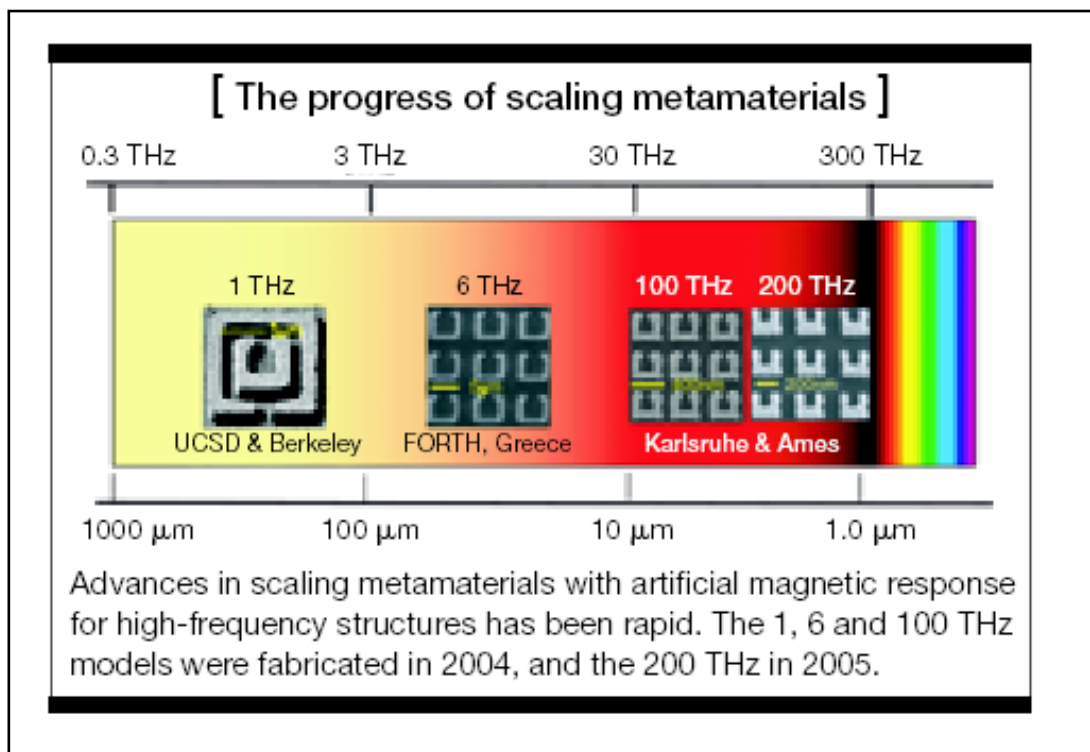


Figure 12 : La forme et les dimensions des métamatériaux gouvernent la fréquence d'utilisation (C. Soukoulis *Optics and Photonics News* June 2006).

3-3 Conception de métamatériaux pour l'optique : les matériaux de Veselago

L'idée est de mettre au point des systèmes présentant des indices de réfraction négatifs (NIM) et appelés également Left Handed Materials (Fig. 13).

Indice de réfraction négatif signifie que la direction du rayon réfracté s'effectue du même côté que le rayon incident par rapport à la normale au plan séparant les deux milieux (Fig. 13).

Left handed materials signifie que la vitesse de phase ω/k devient opposée à la vitesse de groupe $d\omega/dk$. Le vecteur S est le vecteur de Poynting, il représente la direction de propagation de l'énergie portée par l'onde en mouvement.

Fondamentalement, Veselago (1968) a montré que l'indice de réfraction pouvait prendre des valeurs négatives à condition que la constante diélectrique ϵ et la perméabilité magnétique μ soient négatives en même temps d'où la formule $n = -(\epsilon\mu)^{1/2}$.

Left handed materials(LHM) or negative index material (NIM)

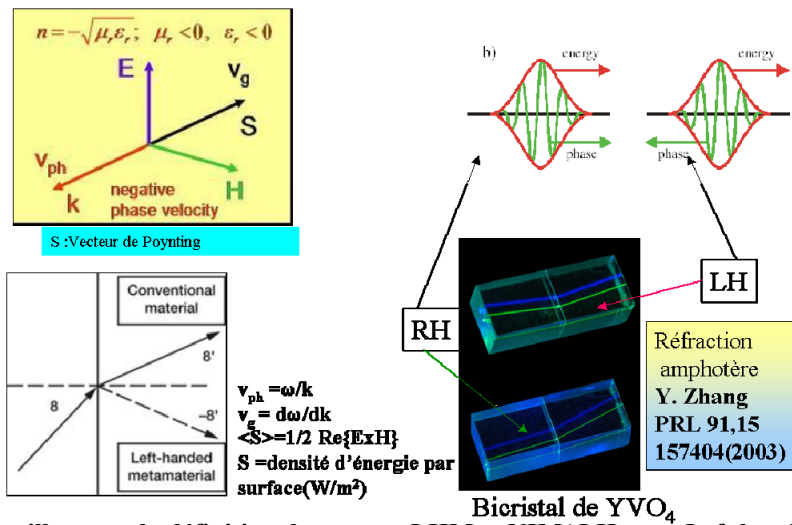


Figure 13 : Schémas illustrant la définition des termes LHM et NIM (LH pour Left handed et RH pour Right handed). Dans la réfraction amphotère sont observées les deux types de réfraction en fonction de l'angle d'incidence.

Sur cette base il est possible de construire des composites pour lesquels cette condition est remplie en assemblant des éléments qui réagissent de façon « utile » aux champs électriques et magnétiques de l'onde incidente. Ont été utilisés pour $\epsilon < 0$ des fils conducteurs métalliques et pour $\mu < 0$ des anneaux ou carrés fendus (Fig14a) constitués de métaux conducteurs en particulier le cuivre. L'espace non conducteur confère à l'anneau une capacité électrique qui induit un circuit oscillant doté d'une fréquence propre et capable d'entrer en résonance avec un champ extérieur variable.

Équations génériques

Veselago $n = -\sqrt{\epsilon\mu}$ if ϵ and $\mu \leq 0$.

Pendry

a) Modèle de Drude Lorentz appliqué à un fil métallique

$$\epsilon(\omega)/\epsilon_0 = 1 - \frac{(\omega_{ep}^2 - \omega^2)}{(\omega^2 - \omega_{e0}^2 + i\gamma\omega)}$$

ω_{ep} electric plasma frequency
 ω_{e0} electric resonance frequency
 ϵ_0 permittivité du vide

b) Perméabilité d'un résonateur "pseudo" circulaire

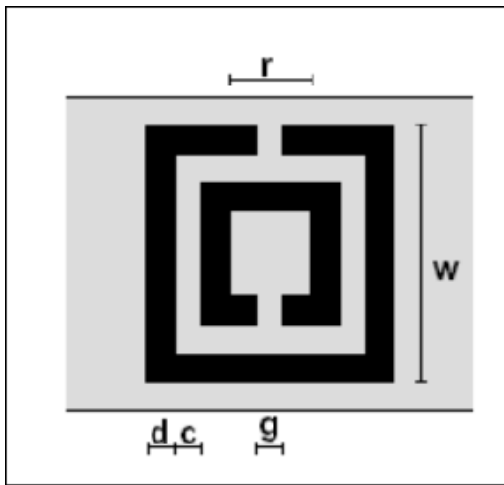
$$\mu(\omega)/\mu_0 = 1 - \frac{(\omega_{mp}^2 - \omega^2)}{(\omega^2 - \omega_{m0}^2 + i\gamma\omega)}$$

ω_{mp} magnetic plasma frequency
 ω_{m0} magnetic resonance frequency
 μ_0 perméabilité magnétique du vide

Les courants induits dans ces structures par l'onde incidente créent à leur tour des champs qui modifient les caractéristiques de l'onde électromagnétique se propageant dans le matériau. La propagation de l'onde initiale est modifiée par la réaction de l'ensemble du composite qui donne ainsi une réponse « effective ».

A titre d'exemple est donné à la figure 14b la variation de la constante diélectrique en fonction de la fréquence pour une structure périodique de fil métallique construite sous la forme d'une maille cubique. $\epsilon(\omega)_{\text{métal}} = 1 - \epsilon_p^2/\epsilon^2$ où la fréquence plasma ϵ_p dépend de la densité de charge – ici les

électrons libres- et de leur masse effective. Pour un espace entre fils de quelques mm et un diamètre de quelques dizaines de μm la fréquence plasma se produit dans le domaine du GHz.



(a)

$\epsilon < 0$

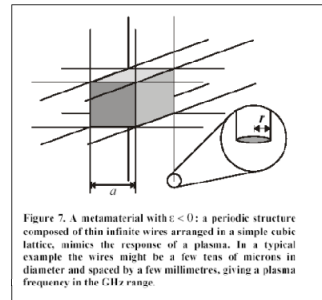


Figure 7. A metamaterial with $\epsilon < 0$: a periodic structure composed of thin infinite wires arranged in a simple cubic lattice, mimics the response of a plasma. In a typical example the wires might be a few tens of microns in diameter and spaced by a few millimeters, giving a plasma frequency in the GHz range.

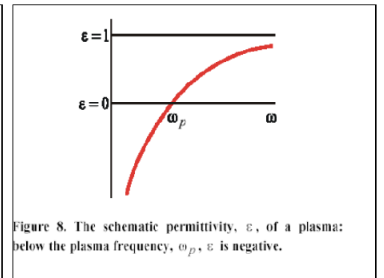


Figure 8. The schematic permittivity, ϵ , of a plasma: below the plasma frequency, ω_p , ϵ is negative.

$$\epsilon = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad (\omega_p^2 = n e^2 / \epsilon_0 m_e)$$

n : densité d'électron, m_e masse effective.

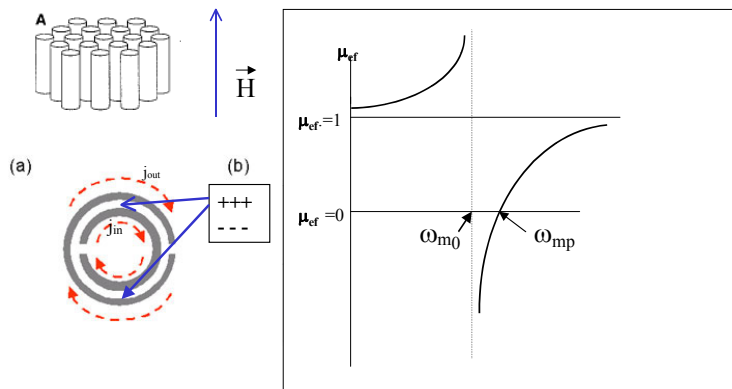
J.B Pendry *Contemporary Physics* 45, n°3(2004)191

(b)

Figure 14 Modèle de métamatériau avec $\mu < 0$ (a) et variation de $\epsilon = f(\omega)$ pour un cube de fil métallique (b)

Pour induire une perméabilité magnétique négative, on envisage des éléments de structure sous la forme d'anneaux de cuivre fendus et alignés dans une direction parallèle à la propagation du champ. Dans ces couches non magnétiques l'application d'un champ externe induit un courant qui produit une réponse magnétique effective. Le couplage de ces résonateurs fendus est de la forme $1 - A\omega^2 / (\omega^2 - \omega_r^2 + i\Gamma\omega)$. La fréquence de résonance ω_r dépend des caractéristiques du réseau. Ces résonateurs peuvent avoir différentes formes et la variation de la perméabilité magnétique en fonction de la fréquence est illustrée par la figure 15 où ω_m est la fréquence de plasma magnétique et ω_{m0} la fréquence de résonance magnétique.

Magnétisme dans les SRR



$$\frac{\mu}{\mu_0} = \frac{\omega_{mp}^2 - \omega_{m0}^2}{\omega_{mp}^2 - \omega^2 + i\omega\gamma_m}$$

ω_{mp} magnetic plasma frequency
 ω_{m0} magnetic resonance frequency

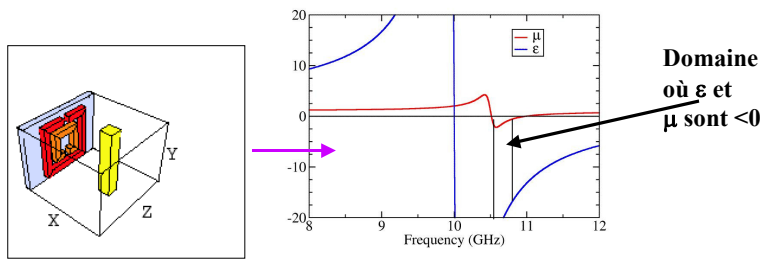
Figure 15 Magnétisme d'un « Split Ring Resonator (SRR) » (M.C.K. Wiltshire et al. *Optics Express* 11, N°7 (2003)709).

Un exemple de modélisation globale est présenté à la figure 16 pour un composite résultant de l'assemblage de fils métalliques et de résonateurs fendus.

Exemple de modélisation globale

$$f = \omega/2\pi \quad f_{mp} = 10,95\text{GHz}, f_{mo} = 10,05\text{GHz}$$

$$\gamma = 10\text{MHz} \quad f_{ep} = 12,8\text{GHz}, f_{eo} = 10,3\text{GHz}$$



Perméabilité magnétique et constante diélectrique en fonction de la fréquence 60

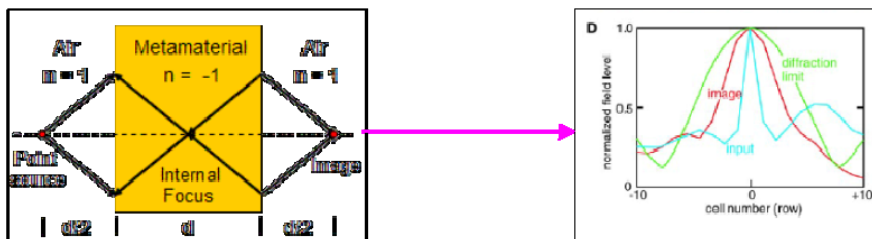
R.A. Shelby et al. *Appl. Phys.Lett.*, 78,489(2001)

Figure 16 : Modélisation d'un métamatériau composé d'un résonateur fendu et d'un fil métallique.

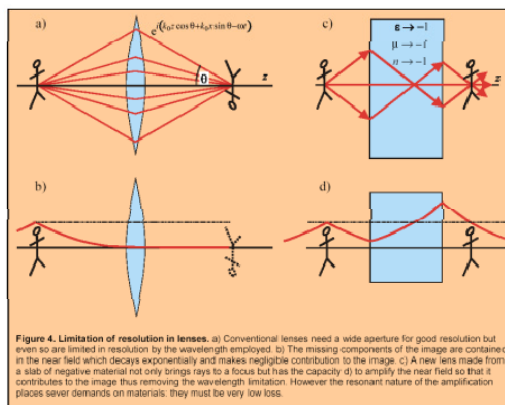
Pour les expériences de réfraction, ce type de matériaux est construit sous forme de prisme dont la structure de base est en téflon. La transmission de tels matériaux présente une bande d'absorption spécifique et les expériences de réfractons montrent très clairement la réalité d'un indice de réfraction négatif. La longueur d'onde incidente est dans le domaine des micro-ondes.

L'une des applications intéressantes de tels systèmes est l'effet de « *lentilles parfaites* ». Considérons un objet placé devant une couche de matériau à indice de réfraction négatif : une image plane, qui est la parfaite copie de l'objet, est détectée de l'autre coté de la couche (Fig. 17). Des expériences effectuées dans le domaine des micro ondes montrent que la résolution peut se

Application directe : the « Perfect lenses »



conventionnel



métamatériau

Amplification du champ proche

Figure 4. Limitation of resolution in lenses. a) Conventional lenses need a wide aperture for good resolution but even so are limited in resolution by the wavelength employed. b) The missing components of the image are contained in the near field which decays exponentially and makes negligible contribution to the image. c) A new lens made from a slab of negative material not only brings rays to a focus but has the capacity d) to amplify the near field so that it contributes to the image thus removing the wavelength limitation. However the resonant nature of the amplification places severe demands on materials; they must be very low loss.

John B. Pendry and D. R. Smith *Physics Today*, December 2003 p 1

Figure 17 Lentille « parfaite ». Résolution en dessous de la limite de diffraction et amplification des ondes évanescentes.

situer en dessous de la limite de diffraction avec une exaltation de l'onde évanescente qui conduit à une amplification de la lumière donc à révéler sur l'image tous les détails de l'objet. Des chercheurs de l'Université de Californie [N. Fang et al. *Science* 308(2005)534] ont mis au point un dispositif qui s'affranchit de la limite de diffraction. Ils obtiennent une résolution de 1/6 de la longueur d'onde utilisée au lieu de 1/2.

4) Vers l'Invisibilité

Actuellement vis à vis du problème de la dissimulation des objets deux conceptions voient le jour :

- 1) des méta matériaux conçus pour courber le rayonnement lumineux autour de l'objet,
- 2) des méta matériaux conçus pour réduire la section efficace de diffusion du rayonnement arrivant sur l'objet.

4-1Premier concept : Courber le rayonnement lumineux autour de l'objet.

L'alternance de systèmes à réfraction conventionnelle et négative doit conduire théoriquement pilotage d'un rayonnement lumineux dans toutes les directions de l'espace.

Dans ce cas, à partir du concept de méta matériaux, on peut imaginer un système où la perméabilité magnétique et la permittivité électrique varient de manière indépendante et continue à travers le matériau avec des valeurs positives et négatives.

Les vecteurs de déplacement électrique \mathbf{D} et d'induction magnétique \mathbf{B} et de Poynting \mathbf{S} peuvent être orientés à volonté par une manipulation exacte des équations de Maxwell. Il s'agit de passer de la topologie initiale à un système plus complexe et de revenir à la configuration initiale.

Modélisation de la dissimulation des Objets



La dissimulation d'un objet peut s'effectuer avec un métamatériau dont la fonction est guider le rayonnement autour de l'objet avant que celui-ci retourne à sa trajectoire initiale.

On considère les champs dans la région $r < R_2$ et on les « comprime » dans la région $R_1 < r < R_2$.

Coordonnées polaires de transformation
 $\mathbf{r}' = \mathbf{R}_1 + \mathbf{r}(\mathbf{R}_2 - \mathbf{R}_1)/R_2$
 $\theta' = \theta$
 $\varphi' = \varphi$

d'où le calcul de $\epsilon', \mu', \epsilon'', \mu''$
 $\epsilon'_{\theta\theta}, \mu'_{\theta\theta}, \epsilon'_{\varphi\varphi}, \mu'_{\varphi\varphi}$

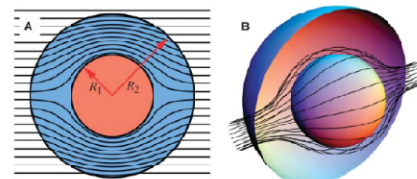


Fig. 2. A ray-tracing program has been used to calculate ray trajectories in the cloak, assuming that $\epsilon_r \gg 1$. The rays essentially follow the Poynting vector. (A) A two-dimensional (2D) cross section of rays striking our system, diverted within the annulus of cloaking material contained within $R_1 < r < R_2$ to emerge on the far side undeviated from their original course. (B) A 3D view of the same process.

J. B. Pendry et al., *Science* 312, 23 juin (2006).

Figure 18 : Dissimulation d'un objet par une sphère illustrant le concept de courbure du rayonnement autour de l'objet.

Dans le cas de la figure 18 où la cape de dissimulation est une sphère, les champs initialement dans la région $r < R_2$ sont comprimés dans l'espace $R_1 < r < R_2$. Dans la région de masquage sont définies les nouvelles coordonnées polaires de μ et de ϵ , point par point, par transformation des équations de Maxwell.

Les hypothèses sur la propagation de l'onde électromagnétique répondent à quatre principes :

1) L'enveloppe entourant l'objet à dissimuler est telle que l'ensemble objet-enveloppe doit avoir les propriétés du vide vu extérieurement.

2) Dans le matériau, le chemin de l'onde électromagnétique est contrôlé par la variation spatiale des paramètres constitutifs.

3) Le rétrécissement de l'espace au niveau de la région impliquée est la cause de cette variation spatiale.

4) De par les équations de Maxwell les variations des paramètres constitutifs sont telles que seules les composantes des tenseurs de permittivité électrique ϵ et de perméabilité magnétique μ sont affectées.

La première expérience pour vérifier ce concept est relative à la dissimulation d'un cylindre de cuivre dans une cape faite d'un métamatériau construite pour fonctionner dans les fréquences micro ondes. Une telle symétrie simplifie les calculs et seuls les paramètres en coordonnées polaires μ_θ (azimutal), ϵ_z (axial) et μ_r (radial) sont pertinents.

Le matériau est constitué de dix cylindres d'épaisseur 381 μm , en Duroid 5870 (composite de microfibras de verre et de polytétrafluoro éthylène-PTFE- utilisé dans les hyperfréquences). Sur ces cylindres sont déposés des résonateurs en cuivre d'épaisseur 17 μm dont les formes et les dimensions sont choisies en fonction des valeurs des composantes de ϵ et μ requises (Fig. 19).

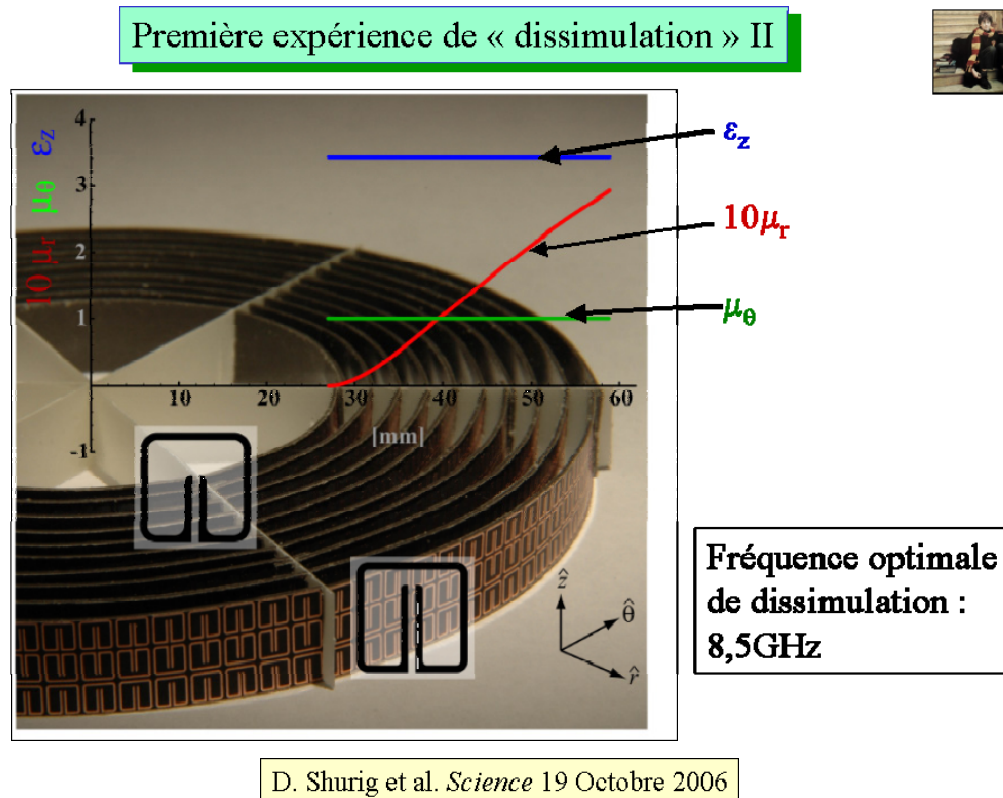
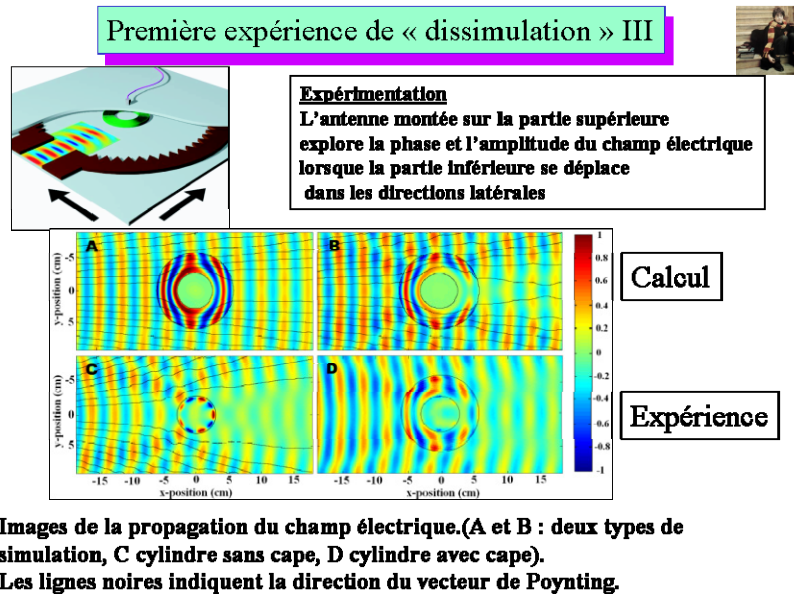


Figure 19 : Métamatériau pour la dissimulation d'un cylindre de cuivre optimisé pour une fréquence de 8,5GHz.

Sur la figure on voit que les valeurs de μ_0 et ϵ_z sont constantes alors que le paramètre μ_r croit du cylindre intérieur vers le cylindre extérieur.

Une antenne montée sur la face supérieure du matériau permet de mesurer la phase et l'amplitude du champ électrique se propageant. La comparaison avec les simulations montre que la fonction de dissimulation est optimisée pour la fréquence de 8,5 GHz. Le front d'onde se sépare en arrivant sur la cape et se reforme au coté opposé (Fig.20). La totalité du rayonnement électromagnétique se condense dans le métamatériau. Le champ, qui se propage, a son intensité atténuée due à l'absorption du matériau protecteur.



D. Shurig et al. *Science* 19 Octobre 2006

Figure 20 : Modélisation et expérimentation du métamatériau

4-2 Deuxième concept : Réduire la section efficace de diffusion du rayonnement arrivant sur l'objet.

Ce deuxième concept a fait uniquement l'objet de simulations.

Considérons un objet sphérique défini par ses constantes a (rayon de la sphère), ϵ la permittivité électrique et μ la perméabilité magnétique. Il est recouvert soit d'un métal « plasmonique », par exemple l'argent, soit d'un métamatériau avec les constantes $a_c > a$, ϵ_c et μ_c (Fig. 21).

La question est de savoir quelles sont les conditions pour que la section efficace d'un rayonnement de longueur déterminé irradiant le système diminue fortement voire s'annule complètement ?

D'une manière générale la réponse à l'excitation est reliée au vecteur de polarisation $\mathbf{P} = (\epsilon - \epsilon_0)\mathbf{E}$.

La sphère centrale est composé d'un matériau où ϵ et μ sont positifs (dans la littérature DPS : double positive material). La sphère extérieure est composé d'un matériau où $\epsilon_c = -3\epsilon_0$; $\mu_c = \mu_0$. Dans la littérature $\epsilon < 0$ est noté : ENG. Dans ces conditions, pour cette seule sphère extérieure, la direction de polarisation est inversée. Pour l'ensemble de ces deux sphères concentriques, il peut donc exister une situation où les deux systèmes se compensent avec une polarisation résiduelle très faible voire nulle.

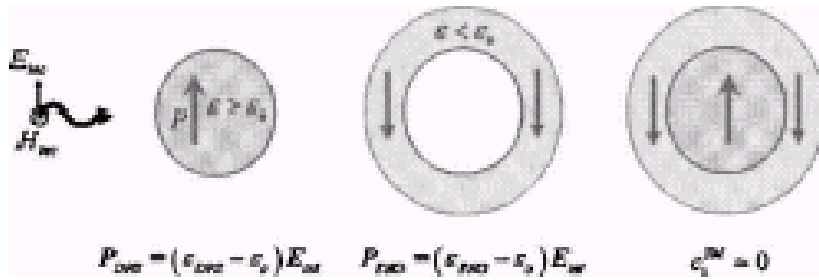


FIG. 4. Heuristic interpretation of the transparency phenomenon: cancellation of the overall dipole moment through an induced negative polarization vector.

Figure 21 Principe de la réduction de la section efficace d'un rayonnement arrivant sur un composite diélectrique sphérique.

En représentant les variations des sections efficaces de diffusion en fonction des paramètres impliqués à savoir les rayons des sphères et les valeurs respectives des perméabilités magnétiques et permittivités électriques, les conditions où Q devient nul en fonction des rapports a_c/λ_0 et a/a_c sont mises en évidence (Fig. 22).

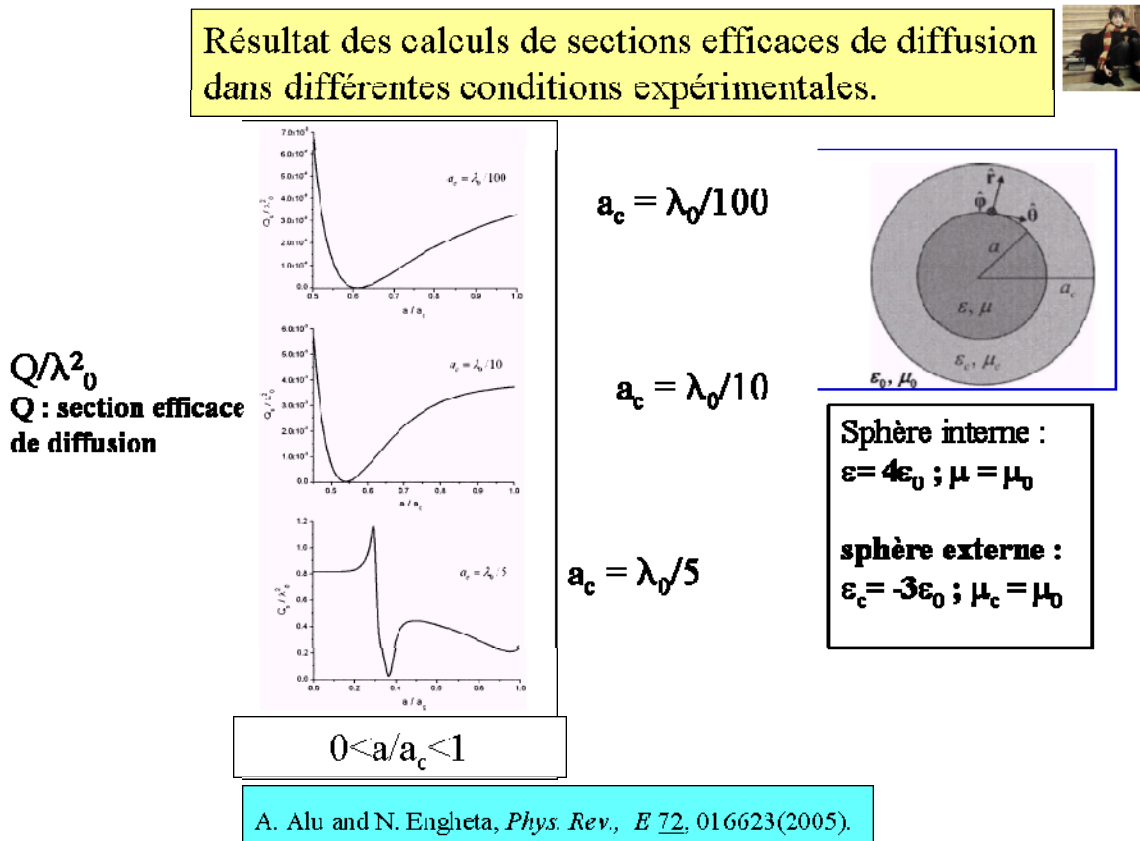


Figure 22 : Calcul des sections efficaces de diffusion dans différentes configurations

La figure 23, représentant la variation de la composante radiale du champ électrique diffusée en fonction de sa position dans un plan perpendiculaire à sa direction de propagation, est donnée

- pour une sphère avec $\epsilon = 10\epsilon_0$, $\mu = \mu_0$ et $a = \lambda_0/10$,
- pour la même sphère recouverte avec un matériau $\epsilon_c = 5\epsilon_0$, $\mu_c = \mu_0$ et $a_c = 1,2a$
- pour la même sphère recouverte avec un matériau $\epsilon_c = 0,1$; ϵ_0 , $\mu_c = \mu_0$ et $a = \lambda_0/5$
- pour la même sphère recouverte avec un matériau $\epsilon_c = 0,1\epsilon_0$; $\mu_c = 0,025 \mu_0$ et $a = \lambda_0/5$

Dans les deux premiers cas le champ électrique induit un moment dipolaire électrique intense à l'intérieur de la sphère, de ce fait, induit un champ électrique dipolaire à l'extérieur de la sphère.

Dans les cas 3 et 4 le champ peut être encore observé à l'intérieur de l'objet mais la couverture élimine à peu près complètement la radiation diffusée à l'extérieur.

Réduction de la réflexion des objets par l'utilisation d'un métamatériau



Onde se propageant le long de z,
Polarisation du champ électrique le long de x

Non couvert ou couvert $\epsilon_c = 5\epsilon_0$:
fort moment dipolaire électrique
dans la sphère d'où une forte diffusion
à l'extérieur de la sphère
SITUATION NORMALE

Couvert $\epsilon_c = 0,1\epsilon_0$: la diffusion est
encore observée à l'intérieur de l'objet
mais la couverture élimine la radiation
diffusée à l'extérieur. ($\mu_c = \mu_0$ et μ_c
 $= 0,025 \mu_0$)

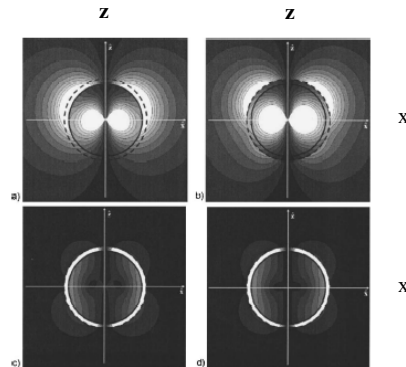


FIG. 10. Contour plots of the distribution of the magnitude of radial component of the scattered electric field in the x - z plane, induced by a plane wave traveling along the z direction with an electric field polarized along the x axis: (a) for a sphere with $\epsilon = 10\epsilon_0$, $\mu = \mu_0$, and $a = \lambda_0/5$; (b) for the same sphere, but covered with $\epsilon_c = 5\epsilon_0$, $\mu_c = \mu_0$, and $a_c = 1,12a$; (c) the same as (b), but with $\epsilon_c = 0,1\epsilon_0$; (d) the same as (c), but with $\mu_c = 0,025\mu_0$.

A. Alu and N. Engheta, *Phys. Rev.*, *E 72*, 016623(2005).

Dans cette approche il y a interaction entre la forme et les propriétés de l'objet (ϵ, μ , dimension, forme, etc.) et celle de sa « couverture ».

Figure 23 : Simulation de la réduction de section efficace de diffusion

5) CONCLUSIONS

Sur le plan de la réfraction des matériaux on peut distinguer :

- 1) **Les cristaux (ou verres)** obéissant aux lois de Snell-Descartes. Ce sont des matériaux homogènes se situant dans le premier quadrant du diagramme permittivité électrique-perméabilité magnétique ($\epsilon > 0$, $\mu > 0$). L'indice est positif.
- 2) **Les cristaux photoniques** qui sont naturels ou artificiels présentent une structure de bande (Maxwell-Bloch). Les propriétés de réfraction dépendent de l'architecture du matériau, les ondes électromagnétiques pouvant être diffractées pour certaines longueurs d'onde dans des directions opposées à ce qui est prédit par la loi de Descartes : Réfraction négative.
- 3) **Les métamatériaux pour l'optique** qui sont des composites artificiels. Pour leurs propriétés électromagnétiques ils sont considérés comme des matériaux homogènes (n_{eff} , ϵ_{eff} , μ_{eff}). Ils peuvent se situer dans le troisième quadrant du diagramme permittivité électrique-perméabilité magnétique (métamatériaux de Veselago : $\epsilon < 0$, $\mu < 0$). Dans ce cas l'indice de réfraction est négatif.
- 4) Les systèmes présentant une **réfraction amphotère** (Voir par exemple Y. Zhang et al. *Physics Rev. Let.*, 91, 15(2003)157404) sont encore à être mieux compris et à développer.

Sur le plan de l'invisibilité

Les concepts actuels décrivant l'« invisibilité » des objets recouverts d'un matériau ne permettent pas de lever le « mystère » de la cape de Harry Potter mais force est de constater qu'ils sont la source d'une réflexion importante en science des matériaux dépassant certainement le seul cadre des propriétés optiques. Finalement :



Remerciements

Harry Potter
Fabien Palencia
Alain Larroche
Yves Garrabos
Stéphane Toulin
Jean Etourneau
Claude Delmas

et tous les membres
de l'ICMCB



Bibliographie Sommaire

- 1) J. Pendry et al *Controlling Electromagnetic fields* , *Science*, 312 (2006) 1780
- 2) D Schurig et al. , “*Metamaterial Electromagnetic Cloak at Microwave frequencies*” , *Science* 314, p. 977(2006).
- 3) V. G. Veselago , *Soviet Physics USPEKHI* 10,509(1968)
Approche théorique(GPI Russian Academy of Science, Moscow).
- 4) R. A. Shelby , D. R. Smith & S Schultz, *Science* 292,77(2001) .
Première vérification expérimentale d'un indice de réfraction négatif. (Université de Californie)
- 5) M. Notomi *Phys Rev. B* 62 n°16, 10696(2002) Extension aux cristaux photoniques (NTT)
- 6) J. B. Pendry & D. R Smith *Physics Today* December (2003)
Review paper (Imperial College, London)
- 7) A. Lakhtakia et al, « *Meet the metamaterials* » *Optics and Photonics News*, Janvier 2007
- 8) A. Alu and N. Engheta, *Achieving transparency with plasmonic and metamaterial coatings*
Phys Rev. E 72(2005)01623

Gilles Le Flem (Mars 2007)