

# Les métamatériaux

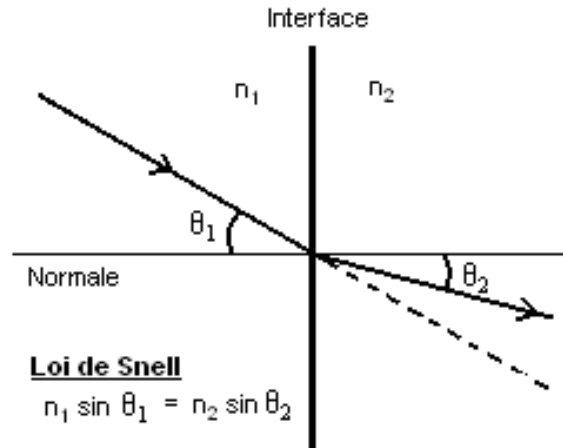
Ryan Arseneault  
Département de physique et d'astronomie  
Université de Moncton, Canada

La science et la technologie ont une soif insatiable de matériaux meilleurs et plus performants qui peuvent pousser les limites du possible. Dans le domaine de l'optique (la science qui s'intéresse à la lumière et à ses applications), un dernier venu fait beaucoup parler de lui : le 'métamatériau', une sorte de structure artificielle possédant des propriétés que l'on ne retrouve dans aucun matériau naturel.

Le métamatériau est une découverte assez récente, le terme étant apparu seulement en 1999. Quoique la physique régissant son fonctionnement fût élaborée dans les années 1960 par le physicien russe Victor Veselago, ce dernier a dû attendre jusqu'en l'an 2000 pour voir la première réalisation de son concept. Pourquoi ce long délai entre la théorie et la validation expérimentale, et pourquoi cet enthousiasme pour ce matériau miracle? Pour répondre à ces questions, il faut revoir quelques concepts de la physique des ondes électromagnétiques, en particulier la lumière.

Un rayon lumineux voyage normalement en ligne droite à une vitesse constante qui dépend du milieu. La lumière voyage généralement moins vite dans un matériau que dans le vide ou l'air. Cela s'explique par le fait que la matière est composée d'un agencement d'atomes qui interagissent avec les champs magnétiques et électriques de la lumière. La lumière perturbe les électrons de l'atome pour créer un déséquilibre local de charge et un dipôle électrique. Cette interaction entre la lumière et les atomes ralentit quelque peu la propagation de la lumière. Comme exemple, prenons le cas du verre où la lumière voyage 30% moins rapidement que dans l'air.

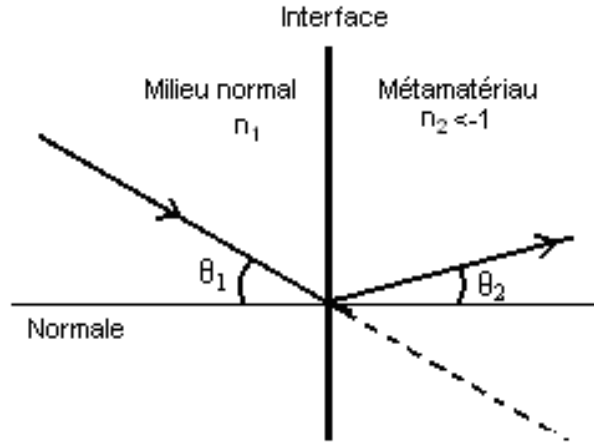
Lorsque la lumière traverse l'interface entre deux milieux qui ont des vitesses de propagation différente (comme l'air et le verre), la lumière subit un changement brusque de trajectoire. Ce phénomène, appelé *réfraction*, est régi par la loi de Snell illustrée à la Figure 1. On peut observer ce phénomène de réfraction quand on submerge un bâton à moitié dans l'eau. Il prend alors une apparence pliée car les rayons lumineux partant de la partie du bâton submergée seront réfractés à l'interface air/eau.



**Figure 1** – Réfraction de la lumière et loi de Snell

L'indice de réfraction  $n$  est le rapport entre la vitesse de la lumière dans le milieu en question et celle dans le vide, donc  $n = c_0/c$ , où  $c_0$  et  $c$  sont les vitesses de la lumière dans le vide et le milieu, respectivement. Plus  $n$  est grand, plus petite est la vitesse de la lumière.

L'indice de réfraction dépend de la structure microscopique du milieu dans lequel la lumière se propage. Les physiciens, en calculant théoriquement cet indice à partir des équations de Maxwell, ont pu trouver que  $n^2 = \epsilon\mu$ , où  $\epsilon$  est la permittivité électrique relative du matériel et  $\mu$  est sa perméabilité magnétique relative. Le paramètre  $\epsilon$  est indicatif de la force d'interaction entre le champ électrique et les dipôles électriques des atomes, tandis que la perméabilité  $\mu$  est reliée à la force d'interaction entre le champ magnétique et les dipôles magnétiques. Dans la vaste majorité des matériaux,  $\epsilon$  et  $\mu$  prennent des valeurs plus grandes ou égales à 1, ce qui fait que  $n$  est habituellement plus grand que 1, et donc la lumière est plus lente dans un matériau que dans le vide. Par contre, lorsque ces deux paramètres sont tous les deux négatifs, il faut pour des raisons mathématiques et techniques que l'indice  $n$  prenne une valeur négative. Le métamatériau est justement un milieu où  $n < 0$ .



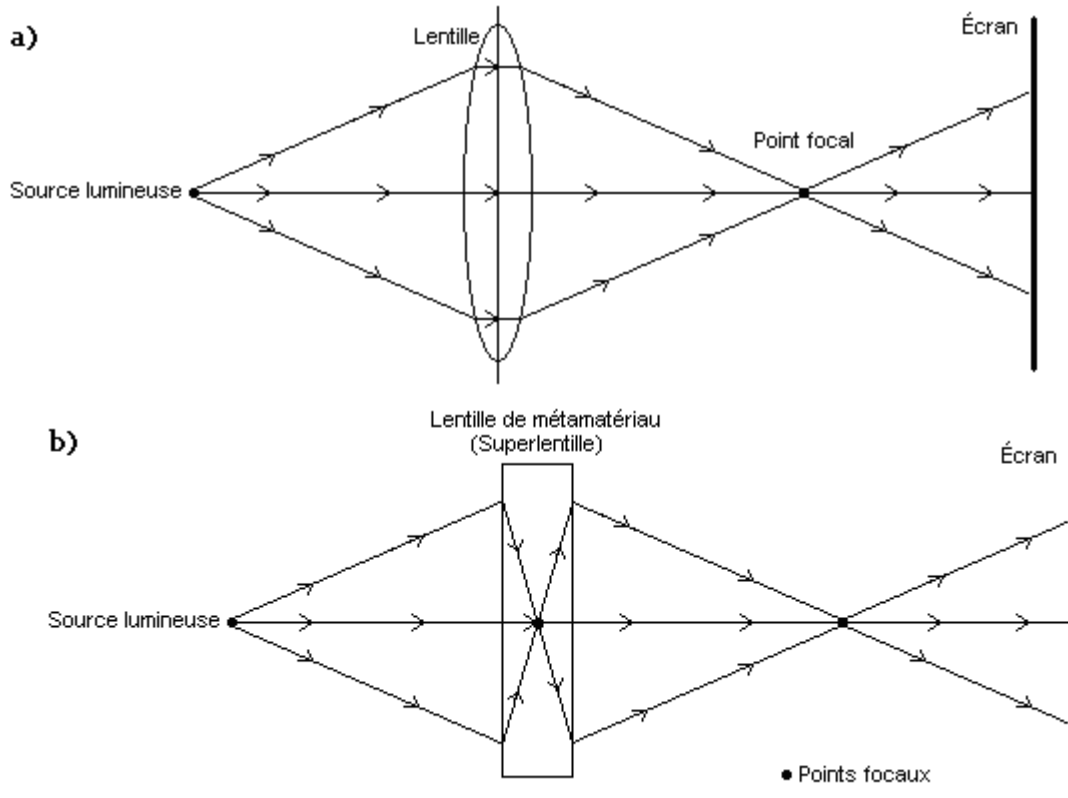
**Figure 2** – Réfraction dans un matériau d’indice négatif (métamatériau)

Par la loi de Snell, comme conséquence nous obtenons un angle de réfraction négatif, comme illustré à la figure 2. C’est un petit détail, direz-vous, mais les conséquences sont importantes. Mais avant de donner les applications, soulignons qu’il est en pratique très difficile de façonner un métamatériau. La Nature produit déjà plusieurs matériaux qui ont  $\epsilon < 0$  – les plasmas<sup>1</sup> et les métaux sont des exemples -- mais  $\mu < 0$  ne se produit que dans des structures artificielles. Cela explique le long intervalle de temps entre la prédiction théorique de Veselago et la création d’un métamatériau. Récemment, l’équipe de Smith et Schultz ont construit un système de maillage métallique dans lequel la perméabilité magnétique est effectivement négative. Lorsque combiné avec un plasma, le résultat global est un métamatériau.

Dans un matériau artificiel comme le métamatériau, aussi longtemps que la texture (le maillage) est sur une échelle beaucoup plus petite que la longueur d’onde de la lumière, le matériau se comporte comme un matériau uniforme et homogène comme il se doit. Il est donc plus facile de fabriquer un métamatériau pour les longues longueurs d’ondes comme les micro-ondes. Dans l’optique visible, où la longueur d’onde est d’un micromètre, c’est un tour de force. Les métamatériaux actuels fonctionnent, au mieux, dans la région infrarouge du spectre.

Une des applications les plus spectaculaires du métamatériau est la "superlentille". Une lentille ordinaire focalise un faisceau lumineux incident en un seul point, le point focal, et permet ainsi de reproduire l’image d’une source de lumière sur un écran (Figure 3a). La focalisation est possible grâce à la réfraction du faisceau sur la forme courbe de la lentille.

<sup>1</sup> Un plasma est une forme de matière où les électrons sont dissociés des noyaux. C’est une sorte de ‘soupe’ de particules chargées. On le retrouve souvent dans des milieux chauds artificiels ou naturels, comme les étoiles.

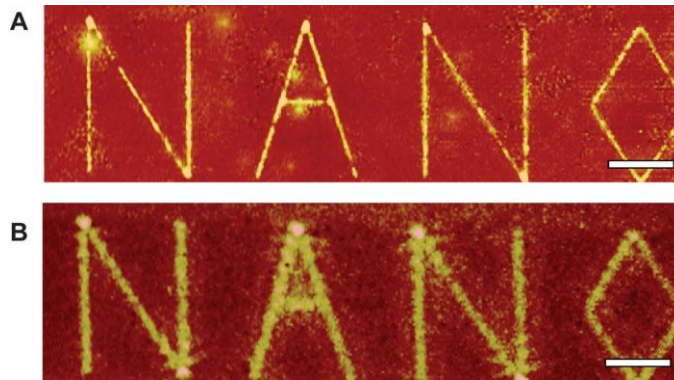


**Figure 3** Focalisation avec une lentille ordinaire (a) et une superlentille (b).

Une lentille faite à partir d'un métamatériau pourrait prendre une forme plane, comme à la Figure 3b. Parce que l'indice de réfraction est négatif, les rayons dévient vers l'intérieur, et si la lentille est suffisamment épaisse, un point focal se forme au milieu de celle-ci. Ce point focal interne n'a pas de grande utilité, mais un autre point focal se forme aussi à l'extérieur. On appelle "superlentille" ce dispositif car son pouvoir de résolution dépasse largement la résolution d'une lentille ordinaire. Étant plane, la superlentille élimine totalement les aberrations sphériques de l'image que produit une lentille ordinaire. Les aberrations sphériques dans une lentille biconcave font en sorte que l'image devient un peu floue. Cela est dû à la forme de la lentille n'est pas optimale : la lumière passant par le bord de la lentille n'a pas le même point focal que la lumière passant près du centre.

La propriété la plus étonnante d'une superlentille est qu'elle peut atteindre une résolution plus grande que celle limitée par la limite de diffraction classique. Cette limite implique qu'il est impossible d'imager clairement une source lumineuse (active ou passive) qui est beaucoup plus petite que la longueur d'onde de la lumière utilisée. La partie de l'onde contenant l'information nécessaire pour obtenir cette résolution se dissipe très rapidement. Par contre, une superlentille amplifie ces parties de l'onde, permettant d'imager une source

lumineuse beaucoup plus petite que la longueur d'onde de la lumière utilisée. La figure 5 montre un exemple frappant de cette différence entre une lentille classique et une superlentille, faite par l'Université de Berkeley.<sup>2</sup> Les chercheurs ont réussi à imager clairement le mot « NANO » écrit avec une épaisseur de ligne d'environ dix fois plus petite que la longueur d'onde de la lumière utilisé. Nous voyons qu'avec la lentille classique, nous obtenons une image plus floue qu'avec la superlentille.



**Figure 4** – Image produite avec une superlentille (A) et une lentille ordinaire (B)  
<sup>3</sup>

Il y a beaucoup d'avantages à avoir un meilleur niveau de résolution. Par exemple, il serait possible d'améliorer la capacité de stockage de disques optiques (les CD, DVD, etc.) puisque qu'il serait possible de graver beaucoup plus finement sur le disque. Dans le domaine de la microscopie, nous serions capables d'observer à la lumière visible de très petits objets, tels les mitochondries à l'intérieur des cellules.

### Références

1. George V. Eleftheriades et Keith G. Balmain, *Negative Refraction Metamaterials* (2005)
2. Ricardo Marqués, Ferran Martín et Mario Sorolla, *Metamaterials with Negative Parameters* (2008)
3. J.B. Pendry, "Negative Refraction Makes a Perfect Lens", *Physical Review Letters* (2000)
4. Anthony Grbic et George V. Eleftheriades, "Overcoming the Diffraction Limit with a Planar Left-Handed Transmission-Line Lens", *Physical Review Letters* (2004)
5. University of Berkeley, [http://www.eurekalert.org/pub\\_releases/2005-04/uoc--ns0041805.php](http://www.eurekalert.org/pub_releases/2005-04/uoc--ns0041805.php)

<sup>2</sup> Pour plus d'informations, consultez la référence 5.

<sup>3</sup> Figure tirée de la référence 5.