



## Metamaterials / Métamatériaux

# Foreword

Invisibility, subwavelength resolution and focusing, negative refraction: what do they have in common? Man's will to control light as he wishes. In the first place, metamaterials are an attempt to fulfil this wish.

Metamaterial is a word that only a few researchers had until the last few years. The subject became a topical question for researchers and scientists with the beginning of the new millennium. The catalyst was a seminal paper published by Sir John Pendry in *Physical Review Letters*, in which he showed that a slab of adequate metamaterial would act as a perfect lens, a lens that would be released from the well-known Rayleigh resolution limit. However, the roots of the topic are older and should be found in a paper authored by V.G. Veselago in 1967 who studied the properties of left-handed materials, materials whose permittivity and permeability are both negative at a given frequency. He showed that a ray incident on an interface of such a material would experience negative refraction, just as if it would have a negative optical index in the Snell–Descartes laws. A basic geometrical construction shows that a simple slab of material with both the permittivity and the permeability equal to minus one would act as a lens. A lens full of surprises: it has the property of volume stigmatism. The only optical component that has the same property is the plane mirror. However, something much more amazing was found by Pendry more than 30 years later: even the evanescent waves of a source point would be focused by this lens in such away that the image would be theoretically perfect. Unfortunately, no natural material has the right properties and it is at this point that metamaterials are necessary.

Suffice it to say that the claim has tremendous consequences for both theoretical and practical reasons. Then, it was not surprising that, on the one hand it grabs the attention of the mass media and, on the other hand, it gives rise to controversy. Is causality respected? Is the energy infinite? How long does it take to reach a stationary state? These are a few of the questions that researchers had to answer. The controversy faded away, but the keen interest of researchers stayed.

Let us come back to the word itself: metamaterial. The Greek prefix “meta” is, here, meaning “beyond”. A metamaterial would have properties that are beyond natural materials. Thus, metamaterials are composite manufactured materials whose properties could not be obtained from homogeneous natural materials. Consequently these properties would not be a simple averaging of those of the constituents. Quite the reverse, the properties arise from the specific structure of the composite. Returning to left-handed media, a suitable array of copper wires and C-shaped resonators could behave as a homogeneous media with both permittivity and permeability negative as was experimentally shown by the group of David Smith from Duke University.

At last but not least, one should not restrict the applications of metamaterials to the subwavelength resolution quest. Invisibility, that has been largely publicized by the mass media, but also directive antennas, or optical memories are some examples of applications imagined by researchers. Invisibility is one of the most important myths that has inspired many authors since antiquity. Not surprising if this research met with a large public; indeed, it makes us come back to the desire of controlling light.

Metamaterials could also be seen as a way to approach a given problem. At first, one would consider if a material without any constraint on its properties could answer the problem. Then, once the ideal material is known, one would consider a separate problem: finding the composite material that will mimic best these required properties.

Metamaterials is a young and fast-moving domain of science, so that for new-comers in the field it would be hard to acquire the background and to keep abreast of recent research. Thus this is the right time to try to take stock of the last ten years of intense research.

In the present issue of the C. R. Physique the reader will find articles intended to present the origin of the subject. S. Guenneau and A. Ramakrishna present us the world of negative index materials while B. Wood's article unveils transformation optics and its application to invisibility. R. McPhedran and his colleagues enlighten us on invisibility by reaction, another way to make objects invisible. D. Lippens allows us to catch a glimpse of the technological difficulties one would meet when designing negative index metamaterials. Microwaves, THz frequency and optical wavelengths are successively considered. Examples of potential applications of metamaterials to antennas and artificial magnetic materials are developed by the IEF group and O. Acher. Despite the fact that the topic has been developed mainly for electromagnetic waves, metamaterials are not restricted to these, and other types of waves could also be of interest. The first application might be for acoustical waves as considered in the paper authored by S. Adams and his colleagues. M. Fink and his colleagues will show us that metamaterials are not the only path to super-resolution.

## Avant-propos

*Invisibilité, résolution et focalisation sub-longueur d'onde, réfraction négative : qu'ont- donc ces sujets en commun ? Le souhait des hommes de d'imposer ses volontés à la lumière. En premier lieu, les métamatériaux sont une tentative d'accomplissement de ce désir.*

*Métamatériau est un mot que seulement peu de chercheurs n'ont pas entendu ou lu ces dernières années. Le sujet est devenu une question d'actualité pour des chercheurs et les scientifiques avec le début du nouveau millénaire. Le catalyseur a été un article fondateur publié par Sir John Pendry dans la revue Physical Review Letters, dans lequel il a montré qu'une lame de métamatériau adéquat agirait comme une lentille parfaite, une lentille qui serait libérée de la limite de résolution de Rayleigh. Mais les racines de ce sujet sont plus anciennes et peuvent être trouvées dans un papier écrit par V.G. Veselago en 1967 qui a étudié les propriétés des matériaux dits de la main gauche, les matériaux dont la permittivité et la perméabilité sont toutes deux négatives à une fréquence donnée. Il a montré qu'un rayon incident sur une interface d'un tel matériau subirait une réfraction négative, exactement comme si on avait un indice optique négatif dans les lois de Snell–Descartes. Une construction géométrique simple permet de montrer qu'une telle lame avec une permittivité et une perméabilité égales au moins un agirait comme une lentille. Une lentille pleine de surprises : elle a la propriété de stigmatisme en volume. Le seul composant optique qui a la même propriété est le miroir plan. Mais John Pendry a découvert encore bien plus étonnant plus de 30 ans après : même les ondes évanescentes issues d'un point de source seraient focalisées par la lentille de telle manière que l'image soit théoriquement parfaite. Cependant, malheureusement aucun matériau naturel n'a les bonnes propriétés et c'est à ce point qu'interviennent les métamatériaux.*

*Bien entendu un tel résultat a des conséquences importantes tout autant d'un point de vue théorique que pratique. Ainsi, il n'était pas étonnant que d'une part il attire l'attention des médias et que d'autre part il provoque une polémique. La causalité est-elle respectée ? L'énergie est-elle infinie ? Combien de temps est-il nécessaire pour atteindre un état stationnaire ? Ce sont quelques unes des questions aux lesquelles les chercheurs ont dû répondre. La polémique s'est éteinte mais l'intérêt des chercheurs est resté.*

*Revenons au mot lui-même : métamatériau. Le préfixe grec « meta » signifie ici « au-delà ». Un métamatériau a donc des propriétés qui sont au delà de celles des matériaux normaux. Ainsi, un metamatériau est un matériau composite manufacturé dont les propriétés ne peuvent pas être obtenues grâce à des matériaux naturels homogènes. En conséquence, ces propriétés ne sont pas simplement une moyenne simple de celles des matériaux constituants. Tout au contraire, ses propriétés résultent de la structure spécifique du composite. Revenons aux matériaux de la main gauche, un réseau approprié de fils de cuivre et les résonateurs en forme de C peut se comporter comme un milieu homogène dont la permittivité la constante et la perméabilité sont toutes deux négative. La démonstration expérimentale en a été faite par le groupe de David Smith de Duke University.*

*Enfin, il ne faut pas limiter les applications des métamatériaux à la quête de la résolution. L'invisibilité, largement diffusée pas les médias grands publiques, mais également les antennes directives, ou les mémoires optiques sont quelques exemples des applications imaginées par des chercheurs. L'invisibilité est l'un des mythes les plus importants qui a inspiré beaucoup d'auteurs depuis l'antiquité. Il n'est donc pas étonnant que ces travaux de recherche rencontrent un large public, en effet cela nous ramène au désir de contrôler la lumière. Les metamateriaux peuvent*

également être vus comme approche pour résoudre un problème donné. Dans un premier temps on considère si un matériau, sans contrainte sur ses propriétés, pourrait répondre au problème. Alors, une fois que le matériau idéal est connu, on considère un problème séparé : trouver le matériau composite qui approchera au mieux les propriétés exigées.

Les métamatériaux constituent un sujet jeune et évoluant rapidement de la science, ainsi les nouveaux arrivants dans ce domaine pourraient éprouver quelques difficultés à acquérir les bases et suivre l'actualité. C'est un bon moment pour essayer d'examiner les dix années de recherche intense. Dans le présent numéro spécial des C. R. de Physique le lecteur trouvera des articles qui présentent les bases du sujet. S. Guenneau et d'A. Ramakrishna nous présentent le monde des matériaux d'indice négatif tandis que l'article de B. Wood' nous dévoile l'optique par transformation et son application à l'invisibilité. R. McPhedran et ses collègues nous éclairent sur l'invisibilité par la réaction, une autre manière de rendre les objets invisibles. D. Lippens nous permet d'avoir un aperçu des difficultés technologiques liées à la réalisation de matériaux d'indice négatifs. Les domaines des de micro-ondes, des THz et des longueurs d'onde optiques sont successivement considérées. Des exemples des applications potentielles des métamatériaux aux antennes et aux matériaux magnétiques artificiels sont développés par le groupe de l'IEF et l'O. Acher. Malgré le fait que le sujet s'est développé principalement pour les ondes électromagnétiques, des métamatériaux ne sont pas limités à ces dernières et d'autres types d'ondes sont également être concernés. La première application pourrait être pour les ondes acoustiques telles que considèrent dans leur article S. Adams et ses collègues. M. Fink et ses collègues nous montrent ensuite que les métamatériaux ne constituent pas la seule voie pour la super-résolution.

Stefan Enoch  
CNRS, Institut Fresnel,  
faculté des sciences et techniques,  
13397 Marseille cedex 20, France  
E-mail address: stefan.enoch@fresnel.fr

Available online 27 August 2009