



INSTITUT DE FRANCE  
Académie des sciences

# *Comptes Rendus*

---

## *Physique*

Boris Gralak and Sébastien Guenneau

### **Foreword**

Volume 21, issue 7-8 (2020), p. 619-623

Published online: 19 January 2021

Issue date: 19 January 2021

<https://doi.org/10.5802/crphys.45>

**Part of Special Issue:** Metamaterials 2

**Guest editors:** Boris Gralak (CNRS, Institut Fresnel, Marseille, France)

and Sébastien Guenneau (UMI2004 Abraham de Moivre, CNRS-Imperial College, London, UK)

 This article is licensed under the  
CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION 4.0 INTERNATIONAL LICENSE.  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



*Les Comptes Rendus. Physique sont membres du  
Centre Mersenne pour l'édition scientifique ouverte*

[www.centre-mersenne.org](http://www.centre-mersenne.org)

e-ISSN : 1878-1535



## Foreword

### *Avant-propos*

**Boris Gralak<sup>\*</sup>,<sup>a</sup> and Sébastien Guenneau<sup>b</sup>**

<sup>a</sup> CNRS, Aix Marseille Univ, Centrale Marseille, Institut Fresnel, Marseille, France

<sup>b</sup> UMI 2004 Abraham de Moivre-CNRS, Imperial College London, London SW7 2AZ, UK

*E-mails:* boris.gralak@fresnel.fr (B. Gralak), s.guenneau@imperial.ac.uk (S. Guenneau)

This double special volume of the Comptes Rendus Physique is the second part of a collection of fourteen articles which aim to draw an overview of the topic of metamaterials. This collection, carried out with the cooperation of leading international experts in the field of metamaterials, includes original research as well as more review-oriented contributions. The articles cover the topics of electromagnetic, acoustic, elastic, and seismic metamaterials and are organized in two double special volumes gathering on one side, articles more-oriented on concepts and models and on the other side, articles reporting results more related to promising potential applications. The two double special volume thus covers theoretical as well as experimental and fundamental as well as applied aspects in different areas of metamaterials from nanoscale (electrodynamics and plasmonics) to meter-scale (geophysics) media.

In this second double volume, the second set of seven articles, where promising applications are reported, is opened with a contribution on tunable metasurface-based waveplates by Nader Engheta and Nasim Estakhri. The authors propose an innovative type of waveplate, for full control on phase retardation and light polarization, consisting of two symmetric metasurfaces separated by a varying distance. The metastructures are designed by inverse design topology optimization. Several numerical examples are shown, including metastructures designed from a genetic algorithm and compatible with currently available fabrication techniques in the visible range.

The following article is a survey in the visible range of dispersion and efficiency engineering of metasurfaces by Benfeng Bai *et al.* Metasurfaces allow the manipulation of electromagnetic waves from the strong resonant behaviors of varied meta-atoms arranged in a subwavelength lattice. After introducing metasurfaces, their advantages and drawbacks, the authors review the recent endeavors in solving the limitations of metasurfaces due to their dispersion and low efficiency. The dispersion and efficiency of metasurfaces are engineered according to the specific applications: ultra-highly sensitive sensing, field modulation, nonlinear interactions, full-color imaging, holographic display ...

---

\* Corresponding author.

Metasurfaces are again considered in the article on metasurfaces for thin antenna applications by Massimiliano Casaletti *et al.* In this contribution, metasurfaces are considered for microwaves, where standard circuit technologies can be used for easy fabrication and integration. The authors review the latest progress in metasurface antenna design, where metasurfaces are exploited to miniaturize the profile, increase the bandwidth, and control the radiation pattern in the near- and far-field regions.

The next article, by S. Anantha Ramakrishna *et al.*, focuses on the properties of waveguides filled with anisotropic metamaterials. The authors show how metamaterials based waveguides offer a whole new range of novel features exploiting anisotropic permittivity and permeability that can have vanishing or even sign-shifting eigenvalues. Zero-index and hyperbolic waveguides lead to modes with fractional and even imaginary orders. They may have potential applications in near-field optical microscopy, Laser amplification, harmonic generation, or self-phase modulation that can occur over short lengths of the waveguide.

The article by Vicent Romero-Garcia *et al.* initiates the series of contributions on classical waves other than electromagnetic with a survey on the design of acoustic metamaterials made of Helmholtz resonators for perfect absorption. The authors first report a robust technique for the design of acoustic metamaterials based on the analysis of the zeros and poles of the eigenvalues of the scattering matrix in the plane of complex frequencies. Then several examples of perfectly absorbing one-dimensional structures and membranes are reviewed. In particular, the possibility to obtain perfect absorption by some defined critical coupling conditions is discussed in detail.

That article on acoustic metamaterials is followed by the review article on the theory and design of metamaterials in mechanics by the metamaterial group of Muamer Kadic at FEMTO-ST. In this article, the authors present the general procedure of designing elastic metamaterials based on masses and springs. It is shown that using this simple approach, any set of effective properties can be designed, including linear elastic metamaterials—defined by bulk modulus, shear modulus, mass density—and nonlinear metamaterials—with instabilities or programmable parts. The designs and the corresponding numerical calculations to illustrate different constitutive behaviors are presented.

The last article of the second special double volume by Stéphane Brûlé at DGI-Ménard Inc and one of us is on the role of seismic metamaterials on soil dynamics. The article actually focuses its attention on control of soils structured by an array of boreholes (that are more akin to photonic crystals than metamaterials, as they essentially work in the Bragg regime), that have been shown to allow for shielding and focusing effects. Some previously unpublished experimental results show the potential for energy harvesting of ambient seismic noise of the array of boreholes. The authors further proposed to bridge the field of time-modulated media and seismic metamaterials in order to generate some new effects leading notably to a concept of analogue seismic computer and some internet of things using seismic ambient noise on a geophysics scale.

**Boris Gralak** is a 1997 graduate engineer of Ecole Polytechnique, received in 2001 the PhD degree of Université d'Aix-Marseille in *Mathematical physics and modelling*, and then worked for 3 years from 2001 to 2004 as researcher in Amsterdam at the research institute AMOLF of Netherlands organization for scientific research (NWO). He is presently Directeur de recherche at Centre national de la recherche scientifique (CNRS) and works at Institut Fresnel in Marseille, France. His main research interests include the mathematical analysis of equations of macroscopic electromagnetism, the modelling of electromagnetic metamaterials, and the design of optical

devices.

**Sébastien Guenneau** is a Director of Research at the Centre National de la Recherche Scientifique who joined the CNRS-Imperial Abraham de Moivre Unité Mixte Internationale in 2019, after working as a lecturer in the Department of Mathematical Sciences at Liverpool University (2004–2005; 2007–2009) and as a CNRS researcher at the Institut Fresnel in Marseille (2006–2019). His main research interests lie in the physics of metamaterials for an enhanced control of wave and diffusion phenomena (including negative refraction and cloaking), in homogenization of multiscale periodic and quasi-periodic media, and in finite element models of acoustic, electromagnetic, hydrodynamic and elastodynamic waves.

## Préface

Ce double volume spécial des Comptes Rendus Physique est la deuxième partie d'une collection de quatorze articles qui ont pour but de faire un tour d'horizon de la thématique des métamatériaux. Cet ensemble de quatorze articles, réalisé avec la coopération d'experts internationaux de premier plan dans le domaine des métamatériaux, comprend des recherches originales ainsi que des contributions plus orientées vers des revues de l'état de l'art. Les articles couvrent les sujets des métamatériaux électromagnétiques, acoustiques, élastiques et sismiques et sont organisés en deux doubles volumes rassemblant d'une part, des articles plus orientés sur les concepts et les modèles et, d'autre part, des articles rapportant des résultats plus liés à des applications potentielles prometteuses. Ces deux volumes doubles couvrent donc les aspects théoriques aussi bien qu'expérimentaux, et fondamentaux aussi bien qu'appliqués, dans différents domaines des métamatériaux, depuis les milieux à l'échelle nanométrique (électrodynamique et plasmonique) jusqu'aux milieux à l'échelle du mètre (géophysique).

Dans ce second volume double, la deuxième série de sept articles, où des applications prometteuses sont présentées, commence avec une contribution sur les lames d'onde accordables basées sur des métasurfaces, par Nader Engheta et Nasim Estakhri. Les auteurs proposent une classe de lames d'onde innovantes, pour un contrôle total du retard de phase et de la polarisation de la lumière, constituées de deux métasurfaces symétriques séparées par une distance variable. Les métastructures sont conçues par des méthodes inverses de type optimisation de topologie. Plusieurs exemples numériques sont présentés, dont des métastructures conçues à partir d'un algorithme génétique et compatibles avec les techniques de fabrication actuellement disponibles dans le domaine du visible.

L'article suivant est une étude dans le domaine visible de l'ingénierie de la dispersion et de l'efficacité des métasurfaces, par Benfeng Bai *et al.* Les métasurfaces permettent la manipulation d'ondes électromagnétiques à partir du comportement fortement résonant de méta-atomes variés disposés sur un réseau sous-longueur d'onde. Après une introduction sur les métasurfaces, leurs avantages et leurs inconvénients, les auteurs passent en revue les efforts récents pour surmonter les limitations des métasurfaces en raison de leur dispersion et de leur faible efficacité. La dispersion et l'efficacité des métasurfaces sont contrôlées et adaptées en fonction des applications spécifiques : détection ultra-très sensible, modulation de champ, interactions non linéaires, image en couleur, affichage holographique . . .

Les métasurfaces sont à nouveau au cœur de l'article sur les métasurfaces pour les applications d'antennes de faible épaisseur, par Massimiliano Casaletti *et al.* Dans cette contribution, les métasurfaces sont considérées pour les micro-ondes, où les technologies standard des circuits imprimés peuvent être utilisées pour une fabrication et une intégration faciles. Les auteurs

passent en revue les derniers progrès dans la conception d'antennes à métasurface, où les métasurfaces sont exploitées pour miniaturiser le profil, augmenter la bande passante et contrôler le diagramme de rayonnement dans les régions de champ proche et lointain.

L'article suivant, par S. Anantha Ramakrishna *et al.*, se concentre sur les propriétés des guides d'ondes remplis de métamatériaux anisotropes. Les auteurs montrent comment les guides d'ondes à base de métamatériaux offrent une toute nouvelle gamme de nouvelles fonctionnalités exploitant la permittivité et la perméabilité anisotropes qui peuvent avoir des valeurs propres de proches de zéro ou même avec changement de signe. Les guides d'ondes à indice proche de zéro et hyperboliques conduisent à des modes avec des ordres fractionnaires et même imaginaires. Ils peuvent avoir des applications potentielles dans la microscopie optique en champ proche, l'amplification laser, la génération d'harmoniques ou l'auto-modulation de phase qui peuvent se produire sur de courtes longueurs du guide d'ondes.

L'article de Vicent Romero-Garcia *et al.* est la première contribution sur les ondes classiques autres qu'électromagnétiques avec une étude sur la conception de métamatériaux acoustiques constitués de résonateurs de Helmholtz pour une absorption parfaite. Les auteurs présentent tout d'abord une technique robuste pour la conception de métamatériaux acoustiques basée sur l'analyse, dans le plan des fréquences complexes, des zéros et des pôles des valeurs propres de la matrice de diffraction. Ensuite, plusieurs exemples de structures et de membranes unidimensionnelles parfaitement absorbantes sont passés en revue. En particulier, la possibilité d'obtenir une absorption parfaite sous certaines conditions de couplage critiques spécifiques est discutée en détail.

Cet article sur les métamatériaux acoustiques est suivi de l'article de revue sur la théorie et la conception des métamatériaux en mécanique, par le groupe de recherche en métamatériaux de Muamer Kadic. Dans cet article, les auteurs présentent la procédure générale de conception de métamatériaux élastiques à partir de masses et de ressorts. Il est montré qu'en utilisant cette approche simple, tout un ensemble de propriétés effectives peut être conçu, y compris les métamatériaux élastiques linéaires — définis par le module de masse, le module de cisaillement et la densité de masse — et les métamatériaux non linéaires — avec des instabilités ou des éléments programmables. Les *designs* et les calculs numériques correspondants pour illustrer différents comportements constitutifs sont présentés.

Le dernier article de ce second double volume spécial, par Stéphane Brûlé de la société DGI-Ménard Inc et l'un de nous, porte sur le rôle des métamatériaux sismiques sur la dynamique des sols. L'article porte sur le contrôle des sols structurés par un réseau de trous de forage (qui s'apparentent plus à des cristaux photoniques qu'à des métamatériaux, car ils fonctionnent essentiellement dans le régime de Bragg), dont il a été démontré qu'ils permettent des effets de miroirs réfléchissants et de focalisation. Certains résultats expérimentaux inédits montrent le potentiel de récupération d'énergie du bruit sismique ambiant du réseau de forages. Les auteurs ont en outre proposé de jeter un pont entre le domaine des milieux modulés dans le temps et des métamatériaux sismiques afin de générer de nouveaux effets conduisant notamment à un concept d'ordinateur sismique analogique et d'Internet des objets utilisant le bruit sismique ambiant à l'échelle géophysique.

**Boris Gralak** est ingénieur de l'École Polytechnique diplômé en 1997, a obtenu en 2001 le diplôme de doctorat de l'Université d'Aix-Marseille en *Physique mathématique et modélisation*, puis a travaillé pendant 3 ans de 2001 à 2004 comme chercheur à Amsterdam à l'institut de recherche AMOLF de l'organisation néerlandaise pour la recherche scientifique (NWO). Il est actuellement directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS) et

travaille à l'Institut Fresnel à Marseille en France. Ses principaux intérêts de recherche sont l'analyse mathématique des équations de l'électromagnétisme macroscopique, la modélisation des métamatériaux électromagnétiques et la conception de dispositifs optiques.

**Sébastien Guenneau** est directeur de recherche au Centre National de la Recherche Scientifique. Il a rejoint l'Unité Mixte Internationale CNRS-Imperial Abraham de Moivre en 2019, après avoir travaillé comme chargé de cours au Département des Sciences Mathématiques de l'Université de Liverpool (2004–2005 ; 2007–2009) et en tant que chercheur CNRS à l'Institut Fresnel de Marseille (2006–2019). Ses principaux axes de recherche résident dans la physique des métamatériaux pour un contrôle accru des phénomènes ondulatoires et des processus diffusifs (y compris la réfraction négative et le camouflage), dans l'homogénéisation de milieux périodiques et quasi-périodiques multi-échelles, et dans les modèles d'éléments finis en acoustique, électromagnétisme, hydrodynamique et élastodynamique.

Boris Gralak  
CNRS, Aix Marseille Univ,  
Centrale Marseille, Institut Fresnel,  
Marseille, France  
boris.gralak@fresnel.fr

Sébastien Guenneau  
UMI 2004 Abraham de Moivre-CNRS  
Imperial College London  
London SW7 2AZ, UK  
s.guenneau@imperial.ac.uk