HAL
open science

Foreword

Boris Gralak, Sebastien Guenneau

To cite this version:

Boris Gralak, Sebastien Guenneau. Foreword. Comptes Rendus. Physique, 2020, 21 (4-5), pp.311-341. 10.5802/crphys.36 . hal-03087380

HAL Id: hal-03087380

https://hal.science/hal-03087380v1

Submitted on 23 Dec 2020

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.

Foreword

Boris Gralak and Sébastien Guenneau
a CNRS, Aix Marseille Univ, CentraleMarseille, Institut Fresnel,Marseille, France
b UMI 2004 Abraham deMoivre-CNRS, Imperial College London, London SW7 2AZ,UK
E-mails: boris.gralak@fresnel.fr (B. Gralak), s.guenneau@imperial.ac.uk (S. Guenneau)
Manuscript received 14th October 2020, accepted 22nd October 2020.

Metamaterial is a word that seems both familiar and mysterious to the layman: on the one hand, this research area born twenty years ago at the interface between physical and engineering sciences requires a high level of expertise to be investigated with advanced theoretical and experimental methods; and on the other hand electromagnetic paradigms such as negative refraction, super lenses and invisibility cloaks have attracted attention of mass media.

Even the origin and meaning of the word metamaterial (formed of the Greek prefix *μετά* meaning beyond or self and the Latin suffix *materia*, meaning material) remains elusive. It seems that most researchers assume metamaterials is a term that refers to composites whose properties go beyond that found in ordinary materials, since it is well-known that the prefix "meta" appears in words like metaphysics and metaphysical. According to Martin Wegener at the Karlsruhe Institute of Technology, who played a pivotal role in the development of metamaterials, a good definition would be that « metamaterials are rationally designed composites allowing for effective medium composites that go qualitatively or quantitatively beyond those of the bulk ingredients ». However, some researchers might argue that this definition does not encompass the case of metamaterials that gain their unique properties from their structured interface, which is the case for instance of metasurfaces. Also, the emerging topic of space-time metamaterials, which in general are complex media with some periodic modulation of their properties both in space and time, can be homogeneous media just modulated in time, and thus actually not encompassed by the definition proposed by M. Wegener: indeed, a piece of glass could acquire extraordinary properties thanks to time modulations, even though it is not a composite. Therefore, looking at the existing literature and the variety of proposed definitions for what a metamaterial should be, it seems fair to say that there is not yet a "universal" definition of a metamaterial. This is especially so, because the term metamaterials is now in use across many fields of physical and engineering sciences, and it has even some applications in life and medical sciences.

Moreover, it is maybe less well-known amongst researchers working in the field of metamaterials that the prefix meta was also used in connection with mathematical logic one hundred years ago by the German mathematician David Hilbert in a research project entitled « metamathematics ». Hilbert implied that this was a project not only beyond ordinary mathematics, but also with self-referencing aspects (think for instance of « This sentence contains thirty-six letters », which is an example of sentence referencing itself). One can therefore argue that there is also some idea of multiple scales, and some interplay between them, in a metamaterial. Even if the first prototypes of electromagnetic metamaterials that appeared at the turn of this century, mostly consist of two scales (the scale of an elementary cell, made of resonant circuits, which is periodically arranged in space, and the scale of the overall composite consisting of hundreds of cells), the past few years have seen the emergence of hierarchical composites with multiple scales. However, it is not straightforward to identify the effective properties of hierarchical metamaterials, especially if the different scales are not well separated. And since their effective properties remain elusive, this might be another class of metamaterials, akin to Russian dolls (or Matrioshka), that is not covered by the definition of M.

Wegener.

So, in ~~this~~ these two special double volumes of the Comptes Rendus Physique, we assume a pragmatic approach, and we simply opt for the definition of metamaterials being some « complex media with rationally designed unusual properties » (but we do not claim they can be modelled as effective composites, and note that a time-modulated piece of glass is compatible with our definition). Now that we have made this word of caution, we would like to point out some important work that predates the birth of metamaterials: this field was not created ex nihilo, and as Sir Isaac Newton used to tell his mathematics students, we believe physics is like standing on the shoulder of giants to see the future. Thus, let us start by a prominent physicist and polymath.

John William Strutt, 3rd Baron Rayleigh (1842-1919) is most famous amongst the optics community for Rayleigh scattering (this explains why the sky is blue). However, Rayleigh waves that are, with Love waves, responsible for many of the earthquake disasters in human infrastructures, also bear the name of Rayleigh, who also contributed to light scattering, sound and hydrodynamic theories, color vision, elasticity theory and thermodynamics of gazes. Rayleigh's textbook, [The Theory of Sound, MacMillan and co., London, 1877], which appeared in two volumes, has been together with Augustus Edward Hough Love's monograph [Some Problems of Geodynamics, Cambridge University Press, Cambridge, 1911], an invaluable source of inspiration for generations of physicists, engineers, and mathematicians. He is viewed by many researchers in the theory of composites, as a precursor of homogenization theory, which is a branch of mathematics devoted to the analysis of partial differential equations with fast oscillating space-periodic coefficients. Lord Rayleigh, who became the second Cavendish Professor of Physics at the University of Cambridge in 1879 (following the death of James Clerk Maxwell), was awarded a Nobel Prize in Physics in 1904 for his « investigations of the densities of the most important gases and for his discovery of argon in connection with these studies », had three sons, the eldest of whom was to become Professor of Physics at Imperial College of Science and Technology in London.

Victor Veselago (1929-2018) is at the origin of the electromagnetic paradigm of negative refraction. He was a Russian physicist born in Crimea, who dedicated his life to electromagnetic waves, starting as a radio amateur during his teenage. The concept of negative refraction in isotropic media with simultaneaously negative permittivity and permeability, touched upon in the book by Sir Arthur Schuster [An Introduction to the Theory of Optics, London: Edward Arnold and Co., 1904], that mentions the possibility to have a Poynting vector opposite to the wave vector, was first put forward in a seminal paper by Veselago [Sov. Phys. Usp. 10, 509, 1968]. However, the technological breakthrough came with the discovery of Sir John Pendry and his colleagues that split ring resonators combined with thin straight wires would enable effective negative permittivity and permeability at certain microwave frequencies [Phys. Rev. Lett. 76, 4773-4776, 1996; IEEE transactions on microwave theory and techniques 47 (11), 2075-2084, 1999]. More precisely, in this seminal article Veselago showed that a plane-parallel plate of a negatively refracting medium would be an optical instrument capable of transmitting images without distortions. Maybe less well known is Veselago's claim that under light absorption in a negatively refracting medium the light pressure changes by light attraction. In parallel to his scientific work on so-called magnetic semi-conductors, Veselago engaged an extensive pedagogical work. From 1961, he taught at the Moscow Institute of Physics and Technology (MIPT) and he delivered there the original course of the faculty cycle « The Basic Elements of Vibration Physics » and simultaneously conducted seminars and laboratory work at the Chair of General Physics. Veselago was one of the pioneers of the distribution of

scientific information about the Internet in Russia: back in 1992, he already organized the mailing of the contents of scientific journals through the Internet. He invented the «Informag» system, which was useful to the Russian scientific community because of the disastrous situation with university libraries in the 90's. In 1998, Veselago organized the first reviewable electronic journal in Russia. He received a number of Russian and foreign awards for his scientific merits such as the 1976 State Prize of the former Soviet Union and in 2004 the Fock's Prize of the Russian Academy of Sciences. In 2009, Veselago received the medal of the American Optical Society for his work, which goes far beyond electrodynamics and optics. Indeed, Veselago's ideas have had tremendous significance in many fields of physics, and we shall present some of these in these two special double volumes of the Comptes Rendus Physique. Let us now present another physicist who has made landmark contributions to the field of metamaterials, which is further popularized well beyond the photonics community.

John Pendry worked as a young researcher on Low-energy electron diffraction at the Cavendish laboratory in Cambridge and after a postdoc on photoelectron spectroscopy at the Bell Labs, then in USA, in 1972-1973. He was then appointed head of the theory group at Daresbury laboratory of the Science and Engineering Research Council of the UK and then a Professor of Physics at Imperial College London in 1981. While in the Bell Labs, Pendry developed the first quantitative theory of so-called extended X-ray absorption fine structure for which he was awarded the Dirac Prize in 1996 and, as head of the theory group in Dalesbury, he published his theory of angle-resolved photoemission spectroscopy, which remains a standard model for probing the structure of the electrons in 1D and 2D crystalline structures, to this date. When he moved to Imperial College in 1981, he maintained a strong activity in his usual research area in surface science, but he also started to study the behavior of electrons in disordered media, and his scattering theory and computational methods for 1D and higher dimensional disordered media found some application in biology, relevant to conductivity of bio-molecules. All this former work led 25 years ago to his first seminal paper on photonic band structures, accompanied by the freeware he designed with his colleagues at Imperial College and the *Universidad Autonoma de Madrid* [Computer Physics Communications 85, 306-322, 1995] that made it possible to unveil extremely low plasmon polaritons in dilute metallic arrays of fibers [Phys. Rev. Lett. 76, 4773-4776, 1996], which together with the famous split ring resonators he proposed for artificial magnetism at the turn of the century [IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 47, 2075, 1999], can be considered as the cornerstone of metamaterials for negative refraction. As we shall recall next, the physics of negative refraction – wherein light rays are refracted at an interface according to the Snell-Descartes laws in which the sign of one refractive index has been flipped – was introduced by the Russian physicist Veselago 30 years before Pendry proposed a route towards complex media that would make it possible. However, Pendry not only made negative refraction possible, but also negative index for evanescent waves and he further proposed that the convergent flat lens envisioned by Veselago has a theoretically unlimited resolution. As a twist to history, the so-called Rayleigh criterion (named after John William Strutt Rayleigh), which states that « two images are just resolvable when the center of the diffraction pattern of one is directly over the first minimum of the diffraction pattern of the other », could be overcome thanks to negative index, according to Pendry [Phys. Rev. Lett. 85, 3966-3969, 2000]. Pendry's article led to a scientific controversy, which has been resolved after a few years of heated debates, thanks to both experimental and theoretical works, of physicists and mathematicians alike. Six years after his seminal paper on the perfect lens, Pendry proposed a route to invisibility via the concept of transformation optics, together with his colleagues David Schurig and David Smith at Duke University in Durham, USA [Science 312, 1780-1782, 2006]. This route known as «transformation optics» amounts to applying some geometric transformation to the Maxwell's

equations, which can fortunately be written in a covariant form that avoids numerous technical difficulties that would arise for instance in the Navier equations for elasticity. However, even if Maxwell's equations behave well under a geometric transform, the invisibility cloak which results from a disc being mapped onto a ring (with the hole inside the ring being concealed to electromagnetic waves), requires the use of an anisotropic heterogeneous shell surrounding the object to cloak, and is different from the proposal of conformal optics put forward by Ulf Leohnardt at Saint-Andrews University in Scotland [Science 312, 1777-1780, 2006], which requires only some spatially varying refractive index, but at the cost of working in 2D geometries (conformal maps requiring a complex plane) and in the ray optics limit.

The research on metamaterials also benefited from important contributions by eminent researchers in physics and electrical engineering. We provide here a (non-exhaustive) list of some of them:

Sergei Tretyakov started his career as a research engineer at the Radiophysics Department of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (formerly the Leningrad Polytechnic Institute in 1980). In the nineties, Tretyakov held an adjunct position at the Electromagnetics Laboratory of Helsinki University of Technology where he worked with Ismo Lindell, Ari Sihvola and Ari Viitanen with whom he published the influential book [Electromagnetic waves in chiral and bi-isotropic media, Artech House Antenna Library, Norwood, MA, USA, 1994] that presents a clear exposure of optical activity and chirality in electromagnetic media akin to metamaterials. During these years, he made important contributions to the theory of spatially dispersive media with Konstantin Simovski at the St. Petersburg Polytechnic University, where he got promoted full professor in 1996. In 2000, he moved to the Helsinki University of Technology as full professor of Radio Engineering, and was soon followed by Konstantin Simovski who holds the same position there. Tretyakov and Simovski have contributed to the career of a young generation of extremely talented research scientists, such as Pavel Belov (the present dean of the faculty of Physics at the ITMO University, formerly the Leningrad Institute of Fine Mechanics and Optics), and Mario Silveirinha (currently a professor of electrical engineering at the University of Lisbon), notably on strong spatial dispersion of wire media in the homogenization limit [Phys. Rev. B 67, 113103, 2003].

Nader Engheta received a BS degree in electrical engineering from the University of Tehran in Iran in 1978, the MS degree in electrical engineering and the Ph.D. degree in electrical engineering and physics from the California Institute of Technology (Caltech), Pasadena, California. After spending one year as a Postdoctoral Research Fellow at Caltech and four years as a Senior Research Scientist at Kaman Sciences Corporation's Dikewood Division in Santa Monica, California, he joined the faculty of the University of Pennsylvania, where he rose through the ranks and is currently H. Nedwill Ramsey Professor. He was the graduate group chair of electrical engineering from 1993 to 1997. He has made seminal contributions to the field of metamaterials, notably on epsilon-near-zero (ENZ) metamaterials that exhibit unique properties in light-matter interaction such as novel Purcell effects, plasmonic cloaking and optical nano circuitry. The plasmonic cloaking route he proposed with Andrea Alù [Phys. Rev. E 72, 016623, 2005] has led to new methods in stealth physics. He and his group have developed several areas and concepts in the fields of metamaterials and plasmonic optics, including, "extreme-parameter" metamaterials and ENZ metamaterials [Phys. Rev. B 75 (15), 155410, 2007]; He contributed to the emerging the field of graphene with the field of metamaterials and plasmonic optics in infrared regime, providing the roadmaps for one-atom-thick optical devices and one-atom-thick information processing; microwave artificial chirality;

« signal-processing » metamaterials, « digital » metamaterials and « meta-machine ». He is currently the H. Nedwill Ramsey Professor at the University of Pennsylvania, Philadelphia, Pennsylvania, USA, affiliated with the departments of Electrical and Systems Engineering, Bioengineering, materials science and engineering, and Physics and Astronomy. He is a Fellow of many international scientific and technical societies. His current research activities span a broad range of areas including nanophotonics, metamaterials, plasmonics, nano-scale optics, graphene optics, imaging and sensing inspired by eyes of certain animal species, optical nanoengineering, time-reversal symmetry breaking and non-reciprocity, microwave and optical antennas, mathematics of fractional operators, and physics and engineering of fields and waves. He has made pioneering contributions to the fields of electromagnetism and microwaves, metamaterials, transformation optics, plasmonic optics, nanophotonics, graphene photonics, nano-materials, nanoscale optics, nano-antennas and miniaturized antennas, physics and reverse-engineering of polarization vision in nature, bio-inspired optical imaging and fractional paradigm in electrodynamics.

Martin Wegener completed his PhD in physics in 1987 at Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt (Germany), he spent two years as a postdoc at AT&T Bell Laboratories in Holmdel (U.S.A.). From 1990-1995 he was professor at Universität Dortmund (Germany) and, since 1995, he has been professor at the Institute of Applied Physics of Karlsruhe Institute of Technology (KIT). Since 2001, he has held a joint appointment as department head at Institute of Nanotechnology of KIT. From 2001-2014 he was the coordinator of the DFG-Center for Functional Nanostructures (CFN) at KIT. Since 2019, he has been a co-speaker at the 3D Matter Made to Order center of excellence. His research interests comprise ultrafast optics, (extreme) nonlinear optics, near-field optics, optical laser lithography, photonic crystals, optical, mechanical, and thermodynamic metamaterials, as well as transformation physics. This research has led to various awards and honors, among which are the SPIE Prism Award 2014 for the start-up company Nanoscribe GmbH. In the past fifteen years, his research group has been particularly active in electromagnetic [Science 306, 1351-1353, 2004; Science 328, 337-339, 2010], mechanical [Applied Physics Letters 100, 191901, 2012; Phys. Rev. Lett. 108, 014301, 2012; Phys. Rev. Lett. 108, 014301, 2014; Proceedings of the National Academy of Sciences 112, 4930-4934, 2015; Science 358, 1072-1074, 2017] and thermal [Phys. Rev. Lett. 110, 195901, 2013] metamaterials. Muamer Kadic (currently assistant professor of physics at the University of Franche-Comté) has been involved in much of Wegener's work on mechanical and thermal metamaterials. Moreover, Wegener received the 2005 Descartes Prize together with Sir John Pendry, David Smith (who contributed essential articles such as the first experimental evidence of negative refraction [Phys. Rev. Lett. 84, 4184, 2000] and microwave cloaking [Science 314, 977-980, 2006]), Ekmel Ozbay and Kostas Soukoulis (who made important contributions to so-called all-angle negative refraction with photonic crystals [Nature 423 (6940), 604-605, 2004], which is a research area in photonics initiated by a theoretical paper coauthored by one of us [J. Opt. Soc. Am. A 17, 1012-1020, 2000]).

The 2005 Descartes Prize for EU research was awarded for the development of artificial structures with entirely new optical properties. Indeed, the European Union acknowledged that the research teams of these prominent researchers created and developed a novel class of artificial metamaterials, at that time called « left-handed materials », as the usual rule of thumb used to describe the triplet (**E, H, k**) should be performed with the left hand instead of the right hand as is conventional. Indeed, in ordinary isotropic media with simultaneously positive permittivity and permeability (hence a positive refractive index), the triplet (**E**, **H**, **k**) is right-handed and the wavevector k points parallel to the Poynting vector **S**, which is defined as the cross product of **E** and **H**. Whereas for simultaneously negative permittivity and permeability

(hence a negative refractive index according to Veselago's seminal paper [Sov. Phys. Usp. 10, 509, 1968]), the wavevector **k** changes direction and the triplet becomes left-handed (and **k** and **S** become anti-parallel, hence the phase and group velocities point in opposite directions). Left-handed media are now known as « negative index materials » (NIMs), and their fascinating properties include negative refraction, inverse Doppler and Cerenkov effects and vacuum impedance matching possibility (so transparency) as discovered by Veselago more than 50 years ago [Sov. Phys. Usp. 10, 509, 1968]. But possibilities offered by NIMs include imaging not constrained by the diffraction limit as further pointed out by Pendry 20 years ago [Phys. Rev. Lett. 85, 3966-3969, 2000]. Fabrication of NIMs has opened up the possibility of novel applications and devices including sub-diffraction limited imaging and other subwavelength devices, as well as miniature antennas and waveguides, and artificial magnetic and bianisotropic materials. However, the 2005 Descartes prize did not foresee that electromagnetic metamaterials would find tremendous applications in other fields of physics. For instance, it was pointed out by Alexander Movchan and one of us in [Phys. Rev. B 70, 125116, 2004] that split ring resonators can be used to create low frequency stop bands in acoustics due to the fact that they behave like locally resonant structures that can be modelled by springs and masses, and thus can form the basis of negatively refracting index media in acoustics [New Journal of Physics 9, 399, 2007]. A similar claim was made by Jensen Li and Che Ting Chan around the same time [Phys. Rev. E 70, 055602, 2004]. However, it is the group of Ping Sheng which first unveiled the true potential of locally resonant sonic materials in a landmark article [Science 289, 1734-1736, 2000]. The group of Martin Wegener pushed the analogy drawn between optics and mechanics by introducing the concept of chiral mechanical metamaterials [Science 358, 1072-1074, 2017]. The latter could be the cornerstone for an elastodynamic cloak built from a Cossérat medium, as proposed by the applied mathematics group of Alexander Movchan at Liverpool University over a decade ago [Appl. Phys. Lett. 94, 061903, 2009]. Another possibility might be to approximate so-called Milton-Briane-Willis media [New Journal of Physics, 8 (10), 248, 2006] with chiral mechanical metamaterials [Phys. Rev. B 99, 214101, 2019].

Following the rise of graphene, carbon nanotubes and other two-dimensional new materials, researchers in metamaterials paid a special interest to composites similar to these two-dimensional materials. It is interesting here to note some connections with the work of Thomas Ebbessen who is a professor of physical chemistry at the University of Strasbourg in France. Ebbessen is known for his pioneering work in nanoscience. He received the 2014 Kavli Prize in Nanoscience for transformative contributions to the field of nano-optics that have broken long-held beliefs about the limitations of the resolution limits of optical microscopy and imaging, together with Stefan Hell (2014 Nobel prize in chemistry), and John Pendry. In 2019, Ebbessen was awarded the CNRS Gold medal in France. While working at the company NEC in the late eighties, Ebbesen discovered that it was possible to transmit light through subwavelength holes milled in opaque metal films under certain resonant conditions. The phenomenon, known as extraordinary optical transmission, involves surface plasmons. Surface plasmons remain a very active research area, with prominent researchers such as Stefan Maier [Plasmonics : fundamentals and applications Springer Science & Business Media, 2007], who started his carreer working with Harry Atwatter at the California Institute of Technology, notably publishing a landmark paper on Local detection of electromagnetic energy transport below the diffraction limit in metal nanoparticle plasmon waveguides [Nature Materials 2, 229-232, 2003] and who currently holds a professorship position at Imperial College London and at the Ludwig-Maximilian Universität München. We note that Stefan Maier has published numerous papers with John Pendry and Paloma Huidobro (a young and extremely talented

researcher who has recently joined the group of Mario Silveirinha in Lisbon) on the control of surface plasmon polaritons using tools of transformation optics as well as optics of graphene.

Federico Capasso is another major contributor to the field of metasurfaces. He received the doctor of Physics degree from the University of Rome in 1973 for his research on fiber optics, and he joined the Bell Labs in 1976. In 1984, he was made a Distinguished Member of Technical Staff and in 1997 a Bell Labs Fellow. He joined Harvard University as a professor in applied physics in 2003. Capasso and his collaborators made many wide-ranging contributions to semiconductor devices, pioneering the design technique known as band-structure engineering. He applied it to novel low noise quantum well avalanche photodiodes, heterojunction transistors, memory devices and lasers. Capasso and his collaborators invented and demonstrated the quantum cascade laser (QCL) [Science 264, 553-556, 1994]. Capasso's group showed that suitably designed plasmonic interfaces consisting of optically thin arrays of optical nano-antennas lead to a powerful generalization of the centuries-old laws of reflection and refraction. They form the basis of flat optics based on metasurfaces, which Capasso has popularized [Science, 334, 333-337, 2011; Nature materials 13, 139-150, 2014] well beyond the photonics community.

Philippe Lalanne who is a Director of Research at CNRS at Institut d'Optique d'Aquitaine, can be certainly included in the pioneering researchers on metasurfaces with his seminal work on effective medium theory of sub-wavelength periodic structures [Journal of Modern Optics 43, 2063-2085, 1996] and on blazed binary subwavelength gratings [Optics Letters 23, 1081-1083, 1998]. Lalanne also brought essential contributions to electromagnetic numerical modelling with the highly improved convergence of the Fourier decomposition for periodic structures [J. Opt. Soc. Am. A 13, 779-784, 1996] and to photonics with the theory of the extraordinary optical transmission [Nature 452, 728-731, 2008]. He has been involved in computational electrodynamics and in applications of subwavelength optical structures for diffractive optics, plasmonics, photonic crystals, integrated optics and microcavities.

However, metamaterials are not only media designed with some space heterogeneity. One can also engineer properties of media by working on the time variable. Here, we would like to cite one researcher whose name is associated with time-reversal mirrors.

Mathias Fink received the Doctorat es-Sciences degree from Paris University in the area of ultrasonic focusing for real-time medical imaging under the supervision of Pierre Alais in 1978. In 1981, he was appointed Professor at the University of Strasbourg. After a stay as a visiting professor at the University of Irvine in the radiology department, he returned to France to become professor at the Paris Diderot University (Paris 7). In 1990 he founded the Waves and Acoustics Laboratory at Ecole Supérieure Physique Chimie Industrielle (ESPCI) in Paris, which became the Institut Langevin in 2009. In 2005, he was appointed professor at ESPCI, where he now is professor emeritus and holds the Georges Charpak chair (named after the Polish-born French physicist, who held the Joliot-Curie Chair at ESPCI and was awarded the Nobel prize in Physics in 1992 for his invention and development of particle detectors). Fink pioneered the development of time-reversal mirrors and Time Reversal Signal Processing [Europhysics Journal Physics 15, 81, 1994 ; Wave Motion 20, 151, 1994 ; Phys. Rev. Lett. 79, 3170, 1997]. He developed many applications of this concept from ultrasound therapy, medical imaging, non-destructive testing, underwater acoustics, seismic imaging, tactile objects, to electromagnetic telecommunications. He also pioneered innovative medical imaging methods: transient elastography, supersonic shear imaging and multi-wave imaging that are now implemented by several companies. Six companies with around 400 staff have been created

from his research: Echosens, Sensitive Object, Supersonic Imagine (which he cofounded notably with Charpak), Time Reversal Communications, Cardiawave, and GreenerWave. We note that Philippe Roux, a director of research at CNRS who is currently the head of Institut des Sciences de la Terre ISTERRE in Grenoble, has made important contributions to seismic metamaterials [Scientific Reports 6, 19238, 2016 ; Geophysical Journal International 220, 1330-1339, 2020] and is a former PhD student of Fink. Metamaterials is a small world ranging from ultrasonics to geophysics.

Another important contributor to the field of seismic metamaterials is Stéphane Brûlé, a researcher in seismic risk assesment, soil-structure interaction, who is also a senior geotechnical engineer, holder of a master's degree research from Ecole Normale Supérieure de Paris and Pierre and Marie Curie University and an engineering diploma in geotechnics of Grenoble-Alpes University in the field of soil mechanics, ground improvement and deep foundations. Brûlé is the leading author of the foundation paper for the field of seismic metamaterials [Phys. Rev. Lett. 112, 133901, 2014] that he coauthored with Emmanuel Javelaud (who was back in 2012 an engineer and researcher in Brûlé's research group at Ménard), Stefan Enoch (director of research at CNRS) and one of us. He also led the first experiment on lensing of surface Rayleigh waves via negative refraction [Scientific Reports 7, 18066, 2017]. He is a member of the International Technical Committee 203 « Geotechnical Earthquake Engineering and Associated Problems », is also an active board-member of the French committee of soil mechanics (CFMS) and of the French earthquake engineering association (AFPS).

Finally, in the tracks of Lord Rayleigh, some eminent researchers working in applied mathematics and theoretical mechanics have contributed to the development of metamaterials. We have already cited many famous researchers (some of whom will appear in what follows as they are contributors ~~of this special volume~~ to the two special double volumes). Nonetheless, we are well aware that many great scientists do not appear in our preface, and we would like to apologize for that. But trying to be more exhaustive, would lead us far beyond the scope of this preface. So let us just mention Alain Bensoussan, Jacques-Louis-lions and Georges Papanicolaou for their landmark book on homogenization theory [Asymptotic Analysis for periodic structures, North-Holland, 1978], and Habib Ammari, Allan Greenleaf, Robert Kohn, Michael Vogelius and Michael Weinstein for their seminal contribution to the mathematical theory of cloaking, and of the members of the mathematics laboratory POEMS of Anne-Sophie Bonnet Ben-Dhia at ENSTA in Palaiseau, which is a leading laboratory for the research on corners consisting of a frequency dispersive medium that share some features with the physics of black-holes. Our list is obviously far from being exhaustive and we would like to apologize for missing other eminent researchers. Let us however, pay a special attention to the work of two mathematicians, since the latest developments of spatially and temporally modulated metamaterials point towards their seminal work. Konstantin Lurie graduated with a Master of Science from the Leningrad Polytechnic Institute in 1959 and a PhD from the Physical-Technical Institute five years afterwards. He obtained the equivalent of the French « Doctorat d'Etat » from the same institute in 1972. His research has been devoted since the sixties to optimal material design. The journal papers and books he published have laid the mathematical foundation of this discipline, as we know it today. The need for optimal design comes from various technological requirements such as devices, which are produced with a better quality, less weight, at a lower cost and with faster fabrication. As explained by Lurie, there are strong ties between optimal design and physics, mechanics, biology, and natural science in general. Optimality embraces many fields such as communication systems and nanostructural design, or traffic control. We note that Andrej Cherkaev, another key player in the theory of composites,

contributed a few influential works with Konstantin Lurie, and there is even a landmark work these researchers published with Graeme Milton and Marco Avellaneda on the conductivity of polycrystals and a phase-interchange inequality [Physica A: Statistical Mechanics and its Applications 157, 148-153, 1989] Lurie extrapolated these principles to material dynamics by introducing a novel concept of dynamic materials [An Introduction to the Mathematical Theory of Dynamic Materials, Springer, 2007], and in this way he has laid the mathematical foundations for metamaterials with properties variable in space and time. Space-time metamaterials has become a fast-developing area of metamaterials.

John Willis is Emeritus Professor of Theoretical Solid Mechanics in the University of Cambridge. He graduated from the Department of Mathematics at Imperial College London where he was an Assistant Lecturer in 1962-1964, before working as a Research Associate at the Courant Institute in New-York during one year. From 1965 to 1972, he was a Director of Research at the Department of Applied Mathematics and Theoretical Physics (DAMTP) of Cambridge University, and then a Professor of Applied Mathematics in Bath University until 1994. He was back as a Professor of Theoretical Solid Mechanics at DAMTP from 1994 to 2007, as well as being Professor of Mechanics at Ecole Polytechnique from 1998 to 2004. He was Editor of the Journal of Mechanics and Physics of Solids for a quarter of a century (from 1982 to 2006). Major research interests of Willis have included static and dynamic problems for anisotropic media, problems of irradiation damage of materials, structural integrity, effective properties of composite materials (both static and dynamic), mechanics of nonlinear composites, stability of strained-layer semiconductor devices. Recent work has been on strain-gradient plasticity and the dynamics of composites (as applied to acoustic metamaterials). He was elected a Fellow of the Royal Society in 1992, a Foreign Member of the US National Academy of Engineering (2004) and a membre Associé Etranger of the French Académie des Sciences (2009). So-called Willis media, named after his seminal paper on variational and related methods for the overall properties of composites that led to new governing equations for elastodynamics waves propagating within heterogeneous media [Advances in applied mechanics, 21, 1-78, 1981], are an area of elastic metamaterials with very intense research activity. Besides from these groundbreaking articles, Willis published some important work on the dynamical interpretation of flutter instability in a continuous medium, [J. Mech. Phys. Solids 54, 2391-2417, 2006], as well as some landmark paper on modifications of Newton's second law and linear continuum elastodynamics, which he coauthored with Graeme Milton, another eminent mathematician [Proc. Roy. Soc. A 463, (2007), 855-880, 2007].

As we suggested with the « metamathematics » of David Hilbert, metamaterials is a subject at the interface between physics and mathematics (notwithstanding the importance of engineering sciences that will come next in the preface). We are honoured to have the polymath Graeme Milton as a contributor of the two special double volumes, who is a Distinguished Professor at the University of Utah and also a Full Professor at Courant Institute of Mathematical Sciences in New-York. When a Master student at Sydney University he published a seminal paper on Bounds on the complex dielectric constant of a composite material [Appl. Phys. Lett. 37, 300-302 (1980)], that lays the foundations of the so-called Bergmann-Milton theory of bounds. Milton's undergraduate honors' thesis was on « Theoretical studies of the transport properties of inhomogeneous media », under the direction of Ross McPhedran who introduced him to the field of composite materials, resulting in the aforementioned publication that received according to Milton more reprint requests than any of his subsequent papers. He did his Ph.D thesis on Some Exotic Models in Statistical Physics at Cornell University Physics Department with Michael Fisher, then a postdoc with Michael Cross at Caltech as a Weingart Fellow, and George Papanicolaou (who coauthored with Alain Bensoussan and Jacques-Louis

Lions the classical book on homogenization theory [Asymptotic Analysis of Periodic Structures, North-Holland, New-York, 1978]) suggested he apply for an assistant professorship at the Courant Institute, where he got tenure and was promoted to Associate Professor after two years, and later to Full Professor. Twenty-five years ago, he published with his colleague Andrej Cherkaev a breakthrough article entitled « Which elasticity tensors are realizable? » [Journal of Eng. Mat. and Technology 117, 483-493, 1995], that introduced a whole new class of composites with unprecedented elastic properties. So-called Pentamode media have been made a reality five years ago thanks to the group of Martin Wegener [Phys. Rev. Appl. 2, 054007, 2014]. In 1999, he became Distinguished Professor of the University of Utah Mathematics Department, and served as department chair from 2002-2005. He published another classical book [The Theory of composites, Cambridge University Press, Cambridge, 2002] that echoes that of Bensoussan, Lions and Papanicolaou. These two books will still serve as an inspiration for physicists and mathematicians working in the field of metamaterials for the years to come.

The paradigm shifts of negative refraction and cloaking have fueled the interest in metamaterials. Thus far, we have presented prominent researchers in this field, whose works are cited in the 14 articles of ~~this special volume~~ these two special double volumes. However, as guest editors of the Comptes Rendus Physique, we have the great pleasure to gather in these double volumes' contributions by other highly distinguished, and extremely gifted, chemists, physicists and mathematicians who have also made landmark contributions to the field of metamaterials.

By alphabetical order, we start with Andrea Alù who graduated with a PhD from the University of Roma Tre in 2007. After spending one year as a postdoctoral research fellow working with Prof. Nader Engheta at the University of Pennsylvania, Philadelphia, in 2009 he joined the faculty of the University of Texas at Austin where he is currently a Senior Research Scientist and an Adjunct Professor. He joined the City University New-York in 2018 as a Professor and the founding director of the Photonics Initiative for its Advanced Science Research Center. He remains affiliated with the Applied Research Laboratories at the University of Texas at Austin, where he is involved in research projects on electromagnetics and acoustics. His current research interests span over a broad range of areas, including metamaterials and plasmonics, electromagnetics, optics and photonics, scattering, cloaking and transparency [Phys. Rev. E 72, 016623, 2005], nanocircuits and nanostructures modeling, miniaturized antennas and nanoantennas, radio frequency antennas and circuits, acoustic and mechanical devices and metamaterials. Alù is currently the President of the Metamorphose Virtual Institute for Artificial Electromagnetic Materials and Metamaterials, and a member of the Administrative Committee of the IEEE Antennas and Propagation Society. Since 2014, Alù has been also serving as Chief Technology Officer of Silicon Audio RF Circulator, a company that holds the exclusive license of a few inventions stemming from Alù's lab around magnetic-free technology for non-reciprocal devices.

Yuri Kivshar studied at the Kharkiv school founded by the Nobel prize laureate Lev Landau. In 1984, he received Doctor of Philosophy degree and in 1989 aged 30 he became the youngest research fellow of Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering. From 1991 he worked as a scientist in USA, Finland, Spain, Germany and in 1993 was invited to the Optical Sciences Centre of Australia and later founded his own laboratory Nonlinear Physics Centre of Autralian National University. Starting from 2000 Yuri Kivshar worked in different fields of nonlinear optics and carried out research of solitons and metamaterials, nonlinear photonic crystal and composite materials theories. He made fundamental impact into self-focusing effect, metamaterials, dielectric nanoantennas, topological insulators, optic signal processing

and optical communications. He also discovered series of solitons and described their dynamic properties in nearly integrable systems. In 2010, Yuri Kivshar was invited to St. Petersburg thanks to the government Megagrant program. He became a scientific leader of the International Research Centre for Nanophotonics and Metamaterials of the ITMO University (Saint-Petersburg, Russia). Throughout his exceptionally prolific career, Yuri Kivshar has made landmark contributions to many fields of physics and he also contributed to the dissemination of ideas of non-linear optics in photonic crystals and metamaterials, notably with the classical book he coauthored with Govind Agrawal [Optical solitons: from fibers to photonic crystals, Academic press, New-York, 2003]. Last, but not least, the work of Yuri Kivshar has received over 80,000 citations according to Google Scholar (with an h-index of 130) which suggests the profound impact his work has in the field of photonics. Besides from that, he has developed an amazing number of collaborations with research groupings worldwide. His extraordinary scientific life is thus reminiscent to that of the mathematician Paul Erdôs who published work with more than 500 collaborators, which prompted the creation of the Erdôs number, the number of steps in the shortest path between a mathematician and Erdős in terms of co-authorships.

Ross McPhedran completed his undergraduate studies and PhD at the University of Tasmania, before moving to Sydney in 1975 as a Queen Elizabeth II Fellow. He was appointed a Senior Lecturer in the School of Physics at Sydney University in 1984, and was promoted to a Personal Chair in 1994. His interests range over many aspects of wave theory, photonics, microstructured fibres, elastodynamics, composite science, mathematical methods and numerical algorithms. McPhedran has made seminal contributions to the field of wave science, its techniques and applications. These have provided methods of unprecedented accuracy and insights which have enabled major developments in the performance of microstructured optical fibres, composite materials, diffraction gratings, photonic and platonic crystals (the latter are crystal plates coined platonics by McPhedran perhaps in reference to Plato, the Athenian philosopher of Ancient Greece). The multipole formulation has been developed as a major tool for solving scattering problems involving electromagnetic and elastic waves with both periodic and finite systems for applications like spectroscopy and photovoltaic and photothermal energy conversion. The associated tools of lattice sums, density of state functions, mode and defect analysis have advanced understanding and methodologies of wave science. Ross McPhedran has played a pivotal role in the career of many research scientists, including one of us. He has attacked during his exceptional career problems ranging from applied physics [Physics World 26, 32, 2013] to pure mathematics [https://arxiv.org/pdf/2003.14241.pdf].

We have presented some of the prominent scientists in the physical, mathematical and engineering sciences, who in our opinion have shaped the field of metamaterials and the theory of composites in general. We do not claim to be exhaustive as the list of prominent scientists who contributed to metamaterials is vast: this list only reflects the opinion of the guest editors. However, as often in sciences, research advances are the work of many individuals and groups who contribute to the dissemination and improvement of great ideas of a happy few. Let us remind another point of history that in the late 1940s, Winston Kock from AT&T Bell Laboratories developed materials that had similar characteristics to metamaterials. In the 1950s and 1960s, artificial dielectrics were studied for lightweight microwave antennas. Then, microwave radar absorbers were researched in the 1980s and 1990s as applications for artificial chiral media. These devices can be considered as complex media with rationally designed unusual properties, so are encompassed by our definition of metamaterials (and also that of Wegener).

Since 1999, researchers who have contributed to this field of metamaterials, include pure and applied mathematicians, theoretical and applied physicists, but also chemists, biologists, mechanical engineers and also geophysicists. Therefore, electromagnetic metamaterials are just one side of the coin. Indeed, correspondences between the governing equations for electromagnetic waves and acoustic, elastodynamic and hydrodynamic waves have allowed to translate unusual phenomena first discovered in electromagnetism to other fields and find exciting applications. For instance, the invisibility cloak proposed by Pendry and his colleagues [Science 312, 1780-1782, 2006] to show the true potential of electromagnetic field control by metamaterials, has been then designed for pressure waves and it might improve the acoustics of concert halls by acoustically concealing columns. One of us has even proposed that seismic metamaterials might provide protection from earthquakes by rerouting or diverting seismic waves with a gigantic invisibility cloak akin to Pendry's cloak for electromagnetic waves. Allied to designing or creating devices, many interesting conceptual questions naturally arise, for instance one recurring question is the reciprocity principle: If light cannot reach a fictional character covered by an invisibility cloak, can he or she see the outer world? In fact, he or she would be in complete darkness if the cloak would have no eyeholes; these two defects in the cloak could then be perceived by an outer observer. Similarly, in other wave systems, one has to think of the consequences of such cloaking or devices, for instance, the invisibility region should act as a quiet zone if one were to design a cloak for acoustic or seismic waves.

Thus far, the physics of negative refraction and cloaking (i.e. of invisibility cloaks) seem dissociated topics, but they reunite in the theory of external cloaking proposed by Graeme Milton and Nicolae Nicorovici [Proc. Roy. Soc. A: Mathematical, Physical and Engineering 462, 3027-3059, 2006]. In this approach, the invisibility cloak consists of a negatively refracting shell, and what's more, the object to conceal lies outside the cloak! The design of an external cloak is radically different to Pendry's cloak, since the latter is based on anisotropic features of the shell (or cloak) surrounding the object to hide. It defies the above arguments of reciprocity principle since the fictional character is no longer surrounded by the cloak, but it lives somewhat in a space-folded region, known as a Riemann sheet, that is not sensed by light illuminating the external cloak and the fictional character. Other counterintuitive physics is that of topological insulators, which are complex media that support a host of symmetry-protected surface states, and are also encompassed by our definition of metamaterials.

The present two special double volumes of the Comptes Rendus Physique aim~~s~~ to draw an overview of the topic of metamaterials. This collection of fourteen articles, 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 sets 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. ~~This~~ The two double volumes thus cover~~s~~ 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 the first of the two double volumes, the first set of seven articles starts by a survey of the physics of negative index materials at the frontier of macroscopic electromagnetism, by one of us. In this contribution, the new phenomena and questions brought by the negative refraction, negative index, perfect flat lens and corner structures are discussed within the frame of macroscopic electromagnetism. As a continuation, an analog of « black hole » phenomenon is

highlighted in simple corner structures filled with frequency dispersive permittivity and arguments are provided to support that, in passive media, the imaginary part of the magnetic permeability can take positive and negative values.

It is followed by an article on first principle homogenization with application to wire media by Mario Silveirinha *et al*., which presents an overview of a homogenization theory for periodic metamaterials. This *ab initio* general approach can be considered as an extension to periodic metamaterials of the frame developed in order to derive the phenomenological equations of macroscopic electromagnetism and represents a remarkable counterpart to the usual homogenization theories established in applied mathematics. The proposed approach is applied to various cases of two-dimensional and three-dimensional electromagnetic wire media allowing to highlight a variety of exotic phenomena and the effect of spatial dispersion.

The next article on transformation optics for plasmonics, by Paloma Huidobro and Antonio Fernandez-Dominguez, reviews the latest theoretical advances in the application of transformation optics for the theoretical description of sub-wavelength plasmonics structures. This article starts with an introduction to the technique of transformation optics. The technique is notably applied to the design of metasurfaces with singular geometries, obtained by mapping an infinite extended volume to a plasmonic nanoparticle, which enable broadband absorption and provide platform for investigation of spatial dispersion. The technique is also exploited to determine analytically the coupling of a quantum emitter with plasmonic nano-particles.

The article by Graeme Milton and Ross McPhedran is a review of anomalous resonance, the associated cloaking, and superlensing. The authors adopt an original and interesting viewpoint on the history of external cloaking and the superlensing, alternative to the ones generally found in the literature, based on the discoveries of ghost sources and anomalous resonances back in 1994. This theoretical article brings a nice introduction to cloaking due to complementary media for quasistatics and fine analyses of anomalous resonances, cloaking and superlensing in the limit as the absorption goes to zero.

The next article on all-dielectric Mie-resonant metaphotonics by Nicolas Bonod and Yuri Kivshar draws the advantages of all-dielectric subwavelength structures when compared with their plasmonic counterparts. This article starts with a review on the electric and magnetic resonances with low multipolar order leading, without metals, to artificial optical magnetism and negative effective permeability. Then is shown how these resonances can be used to achieve the Kerker effect and the Kerker conditions from dielectric particles, and to design all-dielectric nanoantenna for the enhancement of the excitation strength of quantum emitters. This concept of dielectric resonances is applied to the design of all-dielectric metasurfaces for bound states in the continuum and for generating colors and holograms.

Philippe Barois *et al.* contributed a review article on bottom-up nanocolloidal metamaterials at optical frequencies. This article, mainly experimental, reports the design and the fabrication, from nanocolloidal meta-atoms assemblies, of three-dimensional metamaterials in the visible range. The metamaterials are in addition characterized in terms of effective permittivity and permeability. Both kinds of metamaterials involving plasmonic or Mie resonances are addressed, showing for each the powerfulness and drawbacks. Metasurfaces for flat optics and perfect absorbers applications are also addressed.

The last contribution of the first set of articles, by Romain Fleury, Andrea Alù and Farzad Zangeneh-Nejad, addresses the emerging topic of topological wave insulators. This review article starts with the simple one-dimensional example of the Su-Schrieffer-Heeger (SSH) model and then turns to two-dimensional situations, discussing classical wave analogues of Chern, quantum Hall, spin-Hall, Valley-Hall, and Floquet topological insulators. The most recent developments are also reviewed. This article draws a remarkable interdisciplinary research topic with the transposition of concepts, originally discovered in condensed matter

systems, to classical wave physics: photonics, microwaves, phononics, acoustics and mechanics.

In the 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.*. Metasufaces 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…

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.

In conclusion, ~~this~~ these two special double volumes of the Comptes Rendus Physique touche~~s~~ upon many topical subjects in the physics of acoustic, elastic, electromagnetic metamaterials, which were discovered less than a quarter of a century ago. ~~This~~ These two double volumes cover~~s~~ theoretical as well as experimental aspects in these different areas from nanoscale (optics and plasmonics) to meter-scale (civil engineering in seismics) passing through microwaves, acoustics and mechanics. Emerging topics like topological insulators and numerous promising applications from metasurfaces have been addressed. The fourteen articles constituting ~~this~~ these two double volumes give a comprehensive survey of recent advances in this mature field. Much remains to be discovered and doubtless the future will be exciting, we hope that the present collection of articles will help foster theoretical and experimental efforts in metamaterials. We stress that all these contributions promise to revolutionize ways of controlling the propagation of sound, light, and any particular form of waves at macroscopic and microscopic scales. Indeed, potential applications range from subwavelength lensing and optical waveguides, to biosensors and full control of light ellipticity, to enhanced excitation strength of quantum emitter and nonlinear interactions, to flat optics and holographic display, to perfect absorption in acoustics and metasurface antenna, to underwater camouflaging and electromagnetic invisibility, to manipulation of visible light and protection from harmful physical waves (e.g., tsunamis and earthquakes).

We would like to convey our warmest thanks to all authors, who are the principal architects of this special volume of the Comptes Rendus Physique published by the French Academy of Sciences, for their excellent scientific contribution and their willingness to share their knowledge of the mathematics and physics of metamaterials. The assistance and professionalism of the teams of the Centre Mersenne and the Comptes Rendus of the Académie of Sciences is also greatly acknowledged. Last, but not least, we are deeply indebted to Denis Gratias, for his keen interest in the topic of metamaterials and his constant encouragements through the preparation of this volume, especially during the final stage which occurred during the covid-19 pandemic in Europe. We hope that you will enjoy reading these articles and find them as inspirational as we did.

Préface

Le mot « métamatériau » semble à la fois familier et mystérieux au profane : d'une part, ce domaine de recherche né il y a vingt ans à l'interface entre sciences physiques et sciences de l'ingénieur nécessite un haut niveau d'expertise pour être approfondi avec des méthodes théoriques et expérimentales avancées ; et d'autre part, les paradigmes électromagnétiques tels que la réfraction négative, les super lentilles et les capes d'invisibilité ont attiré l'attention des médias de masse.

Il s'avère que même l'origine et la signification du mot métamatériau (formé du préfixe grec *μετά* signifiant au-delà ou soi et du suffixe latin *materia*, signifiant matériel) restent insaisissables. Il nous semble que la plupart des chercheurs supposent que les métamatériaux sont une notion qui fait référence aux composites dont les propriétés vont au-delà de celles trouvées dans les matériaux ordinaires, car il est bien connu que le préfixe « méta » apparaît dans des mots comme métaphysique et métaphysique. Selon Martin Wegener du Karlsruhe Institute of Technology, qui a joué un rôle central dans le développement des métamatériaux, une définition appropriée serait que « les métamatériaux sont des composites rationnellement conçus permettant des propriétés effectives qui vont qualitativement ou quantitativement au-delà de ceux du mélange des ingrédients les constituant ». Cependant, certains chercheurs pourraient argumenter que cette définition n'englobe pas le cas des métamatériaux qui tirent leurs propriétés uniques de leur interface structurée, ce qui est le cas par exemple des métasurfaces. De plus, le sujet émergent des métamatériaux spatio-temporels, qui sont en général des milieux complexes avec une certaine modulation périodique de leurs propriétés à la fois dans l'espace et dans le temps, peuvent être des mlieux homogènes simplement modulés dans le temps, et donc en fait non couverts par la définition proposée par Wegener : en effet, un morceau de verre pourrait acquérir des propriétés extraordinaires grâce aux modulations temporelles, même s'il ne s'agit pas d'un composite. Par conséquent, en regardant la littérature existante et la variété des définitions proposées pour ce qu'un métamatériau devrait être, il semble juste de dire qu'il n'y a pas encore de définition « universelle » d'un métamatériau. Ceci est particulièrement vrai, car le terme métamatériaux est maintenant utilisé dans de nombreux domaines des sciences physiques et de l'ingénierie, et il a même des applications dans les sciences de la vie et les sciences médicales.

Par ailleurs, il est peut-être moins connu parmi les chercheurs travaillant dans le domaine des métamatériaux que le préfixe « méta » a également été utilisé par le mathématicien allemand David Hilbert en relation avec la logique mathématique il y a cent ans dans un projet de recherche intitulé « métamathématiques ». Hilbert a laissé entendre qu'il s'agissait d'un projet non seulement au-delà des mathématiques ordinaires, mais aussi avec des aspects d'auto-

référencement (pensez par exemple à « Cette phrase contient trente-six lettres », qui est un exemple d'auto-référence de phrase). On peut donc affirmer qu'il y a aussi une idée d'échelles multiples, et une certaine interaction entre elles, dans un métamatériau. Même si les premiers prototypes de métamatériaux électromagnétiques apparus au tournant de ce siècle, se composent majoritairement de deux échelles (l'échelle d'une cellule élémentaire, constituée de circuits résonants, qui est périodiquement disposée dans l'espace, et l'échelle du composite global constitué de centaines de cellules), ces dernières années ont vu l'émergence de composites hiérarchiques à échelles multiples. Cependant, il n'est pas simple d'identifier les propriétés effectives des métamatériaux hiérarchiques, surtout si les différentes échelles ne sont pas bien séparées. Et comme leurs propriétés effectives restent insaisissables, cela pourrait être une autre classe de métamatériaux, semblable aux poupées russes (ou Matrioshka), qui n'est pas couverte par la définition de M. Wegener.

Ainsi, dans ces deux doubles volumes spéciaux des Comptes Rendus Physique, nous supposons une approche pragmatique, et nous optons simplement pour la définition des métamatériaux comme étant des « milieux complexes aux propriétés inhabituelles rationnellement conçues » (mais nous ne prétendons pas qu'ils peuvent être modélisés comme des composites aux propriétés effectives, et notez qu'un morceau de verre modulé dans le temps est compatible avec notre définition). Maintenant que nous avons fait cette précision, nous tenons à souligner certains travaux importants antérieurs à la naissance des métamatériaux : ce domaine n'a pas été créé ex nihilo, et comme Sir Isaac Newton avait l'habitude de le dire à ses étudiants en mathématiques, nous pensons que faire de la physique revient à se tenir sur l'épaule de géants pour voir l'avenir. Ainsi, commençons par un physicien et un polymathe de premier plan.

John William Strutt, 3ème baron Rayleigh (1842-1919) est célèbre dans la communauté de l'optique pour la diffusion Rayleigh (ce phénomène explique pourquoi le ciel est bleu). Cependant, les ondes de Rayleigh qui sont, avec les ondes de Love, responsables de nombreuses catastrophes sismiques dans les infrastructures humaines, portent également le nom de Rayleigh, qui a également contribué à la diffusion de la lumière, aux théories sonores et hydrodynamiques, à la vision des couleurs, à la théorie de l'élasticité et à la thermodynamique des gaz. Le livre de Rayleigh, [The Theory of Sound, MacMillan and co., London, 1877], paru en deux volumes, a été accompagné de la monographie d'Augustus Edward Hough Love [Some Problems of Geodynamics, Cambridge University Press, Cambridge, 1911], une source d'inspiration inestimable pour des générations de physiciens, d'ingénieurs et de mathématiciens. Il est considéré par de nombreux chercheurs en théorie des composites, comme un précurseur de la théorie de l'homogénéisation, qui est une branche des mathématiques consacrée à l'analyse d'équations aux dérivées partielles avec des coefficients périodiques spatiallement et oscillant rapidement. Lord Rayleigh, qui est devenu le deuxième professeur Cavendish de physique à l'Université de Cambridge en 1879 (suite à la mort de James Clerk Maxwell), a reçu un prix Nobel de physique en 1904 pour ses « recherches sur les densités des gaz les plus importants et pour sa découverte de l'argon en relation avec ces études » et a eu trois fils, dont l'aîné deviendra professeur de physique à l'Imperial College of Science and Technology de Londres.

Victor Veselago (1929-2018) est à l'origine du paradigme électromagnétique de la réfraction négative. Il était un physicien russe né en Crimée, qui a consacré sa vie aux ondes électromagnétiques, en commençant comme radioamateur pendant son adolescence. Le concept de réfraction négative dans les milieux isotropes avec permittivité et perméabilité simultanément négatives, abordé dans le livre de Sir Arthur Schuster [An Introduction to the Theory of Optics, London: Edward Arnold and Co., 1904], qui mentionne la possibilité d'avoir un vecteur de Poynting opposé au vecteur d'onde, a été proposé pour la première fois dans un

article fondateur de Veselago [Sov. Phys. Usp. 10, 509, 1968]. Cependant, comme mentionné ci-dessus, la percée technologique est venue avec la découverte de Sir John Pendry et de ses collègues que des résonateurs à anneaux fendus combinés à des fils droits et minces permettraient une permittivité et une perméabilité effectives négatives à certaines fréquences micro-ondes [Phys. Rev. Lett.76, 4773-4776, 1996 ; IEEE transactions on microwave theory and techniques 47 (11), 2075-2084, 1999]. Plus précisément, dans l'article fondateur de 1968, Veselago a montré qu'une simple lame à faces parallèles d'un milieu d'indice de réfraction négatif serait un instrument optique capable de transmettre des images sans distorsions. Une affirmation de Veselago peut-être moins connue est selon laquelle sous absorption de lumière dans un milieu à réfraction négative, la pression lumineuse change par attraction lumineuse. Parallèlement à ses travaux scientifiques sur les semi-conducteurs dits magnétiques, Veselago a engagé un vaste travail pédagogique. À partir de 1961, il enseigne à l'Institut de physique et de technologie de Moscou (MIPT) et y donne le cours original du cycle universitaire « Les éléments de base de la physique des vibrations » et dirige simultanément des séminaires et des travaux de laboratoire à la Chaire de physique générale. Veselago a été l'un des pionniers de la diffusion d'informations scientifiques sur Internet en Russie : en 1992, il organisait déjà l'envoi par Internet du contenu des revues scientifiques. Il a inventé le système « Informag », qui a été utile à la communauté scientifique russe en raison de la situation désastreuse des bibliothèques universitaires dans les années 90. En 1998, Veselago a organisé la première revue électronique à comité de lecture en Russie. Il a reçu un certain nombre de prix russes et étrangers pour ses recherches scientifiques tels que le prix d'État 1976 de l'ex-Union soviétique et en 2004 le prix Fock de l'Académie des sciences de Russie. En 2009, Veselago a reçu la médaille de l'American Optical Society pour son travail, qui va bien au-delà de l'électrodynamique et de l'optique. En effet, les idées de Veselago ont eu une importance considérable dans de nombreux domaines de la physique, et nous en présenterons quelques-unes dans ces deux doubles volumes spéciaux des Comptes Rendus Physique. Nous présentons maintenant un autre physicien qui a apporté des contributions majeures dans le domaine des métamatériaux, qui est encore popularisé bien au-delà de la communauté photonique.

John Pendry a travaillé comme jeune chercheur sur la diffraction d'électrons à basse énergie au laboratoire Cavendish de Cambridge et après un post-doctorat en spectroscopie photoélectronique aux Bell Labs aux USA, en 1972-1973. Il a ensuite été nommé directeur du groupe de théorie au laboratoire de Daresbury du Science and Engineering Research Council du Royaume-Uni, puis professeur de physique à l'Imperial College de Londres en 1981. Alors qu'il travaillait aux Bell Labs, Pendry a développé la première théorie quantitative de la structure fine d'absorption des rayons X étendue pour laquelle il a reçu le prix Dirac en 1996 et, en tant que chef du groupe de théorie à Dalesbury, il a publié sa théorie de la spectroscopie de photoémission résolue en angle, qui reste à ce jour un modèle standard pour sonder la structure des électrons dans les structures cristallines 1D et 2D. Lorsqu'il a pris son poste actuel de professeur à l'Imperial College en 1981, il a maintenu une forte activité dans son domaine de recherche familier en science des surfaces, mais il a également commencé à étudier le comportement des électrons dans des milieux désordonnés, et a dévelopé sa théorie de la diffusion et ses méthodes de calcul pour des structures désordonnées en 1D et en dimension supérieure. Ces milieux ont trouvé une application en biologie relevant de la conductivité des biomolécules. Tous ces travaux antérieurs ont conduit il y a 25 ans à son premier article fondateur sur les structures de bandes photoniques, accompagné du logiciel gratuit qu'il a conçu avec ses collègues de l'Imperial College et de l'*Universidad Autonoma de Madrid* [Computer Physics Communications 85, 306-322, 1995] qui a rendu possible de dévoiler des plasmons polaritons à des fréquences extrêmement faibles dans des réseaux de fibres métalliques diluées [Phys. Rev. Lett. 76, 4773-4776, 1996], qui, avec les célèbres résonateurs à anneau fendu, qu'il

a proposés pour le magnétisme artificiel au tournant du siècle [IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques 47, 2075, 1999], peuvent être considérés comme la pierre angulaire des métamatériaux pour la réfraction négative. Comme nous le rappellerons ensuite, la physique de la réfraction négative - dans laquelle les rayons lumineux sont réfractés à une interface selon la loi de Snell-Descartes dans laquelle le signe d'un indice de réfraction a été inversé - a été introduite par le physicien russe Veselago 30 ans avant que Pendry propose une voie vers des milieux complexes qui la rendraient possible. Cependant, Pendry a non seulement rendu possible la réfraction négative, mais aussi un indice négatif pour les ondes évanescentes et il a en outre proposé que la lentille plate convergente envisagée par Veselago ait une résolution théoriquement illimitée. Comme un pied de nez à l'histoire, le célèbre critère de Rayleigh (d'après John William Strutt Rayleigh), qui stipule que « deux images sont simplement résolubles lorsque le centre du diagramme de diffraction de l'une est directement sur le premier minimum du diagramme de diffraction de l'autre », pourrait être dépassé grâce à un indice négatif, selon Pendry [Phys. Rev. Lett. 85, 3966-3969, 2000]. L'article de Pendry a conduit à une controverse scientifique, qui s'est résolue après quelques années de débats houleux, grâce à des travaux expérimentaux et théoriques, de physiciens comme de mathématiciens. Six ans après son article fondateur sur la lentille parfaite, Pendry a proposé une voie vers l'invisibilité *via* le concept de l'optique de transformation, avec ses collègues David Schurig et David Smith de l'Université Duke à Durham, USA [Science 312, 1780-1782, 2006]. Cette technique dite de l'« optique de transformation » revient à appliquer une certaine transformation géométrique aux équations de Maxwell, qui peuvent s'écrire sous une forme covariante évitant de nombreuses difficultés techniques qui se poseraient par exemple dans les équations de Navier pour l'élasticité. Cependant, même si les équations de Maxwell sont invariantes après une transformation géométrique, la cape d'invisibilité qui résulte de la transformation d'un disque en un anneau (le trou à l'intérieur de l'anneau étant dissimulé aux ondes électromagnétiques), nécessite l'utilisation d'une coque hétérogène anisotrope entourant l'objet à masquer. Une classe différente de capes d'invisibilité, basée sur l'optique conforme, a été proposée par Ulf Leohnardt à l'Université de Saint-Andrews au Royaume-Uni [Science 312, 1777-1780, 2006]. Cette deuxième solution ne nécessite que quelques indices de réfraction spatialement variables, mais au prix de travailler en géométrie 2D (les transformations conformes nécessitant un plan complexe) et dans la limite de l'optique des rayons.

La recherche sur les métamatériaux a également bénéficié d'importantes contributions d'éminents chercheurs en physique et en génie électrique. Nous fournissons ici une liste (non exhaustive) de certains d'entre eux.

Sergei Tretyakov a commencé sa carrière comme ingénieur de recherche au Département de radiophysique de l'Université polytechnique Pierre le Grand de Saint-Pétersbourg (anciennement Institut polytechnique de Leningrad en 1980). Dans les années 90, Tretyakov a occupé un poste auxiliaire au laboratoire d'électromagnétique de l'Université de technologie d'Helsinki où il a travaillé avec Ismo Lindell, Ari Sihvola et Ari Viitanen avec qui il a publié l'influent ouvrage [Ondes électromagnétiques dans les milieux chiraux et bi-isotropes, Artech House Antenna Library, Norwood, MA, USA, 1994] qui expose une présentation claire de l'activité optique et de la chiralité dans des milieux électromagnétiques apparentés aux métamatériaux. Au cours de ces années, il a apporté d'importantes contributions à la théorie des milieux spatialement dispersifs avec Konstantin Simovski à l'Université polytechnique de Saint-Pétersbourg, où il a été promu professeur en 1996. En 2000, il a rejoint l'Université de technologie d'Helsinki en tant que professeur de Radio Engineering, et fut rapidement suivi par Konstantin Simovski qui y occupe également un poste de professeur. Tretyakov et Simovski ont contribué à la carrière d'une génération de jeunes chercheurs extrêmement talentueux, tels

que Pavel Belov (le doyen de la faculté de physique de l'Université ITMO) et Mario Silveirinha (actuellement professeur d'électrotechnique à l'Université de Lisbonne), notamment reconnus pour leurs travaux sur la forte dispersion spatiale des milieux filaires dans la limite d'homogénéisation [Phys. Rev. B 67, 113103, 2003].

Nader Engheta a été diplômé en génie électrique de l'Université de Téhéran en Iran en 1978, puis a obtenu une maîtrise en génie électrique et un doctorat en génie électrique et physique du California Institute of Technology (Caltech), Pasadena, Californie. Après avoir passé un an en tant que chercheur postdoctoral à Caltech et quatre ans en tant que chercheur principal à la division Dikewood de Kaman Sciences Corporation à Santa Monica, en Californie, il a rejoint la faculté de l'Université de Pennsylvanie, où il est actuellement Professeur H. Nedwill Ramsey et où il a été président du groupe d'études supérieures en génie électrique de 1993 à 1997. Il a apporté des contributions fondamentales au domaine des métamatériaux, notamment sur les métamatériaux à indice proche de zéro (ou métamatériaux ENZ pour *epsilon-near-zero* en anglais) qui présentent des propriétés uniques dans l'interaction lumière-matière, comme les nouveaux effets de Purcell, le camouflage plasmonique et les nano-circuits optiques. L'exploitation de la plasmonique pour rendre des objets « invisibles » ou « transparents », qu'il a proposée dès 2005 avec Andrea Alù [Phys. Rev. E 72, 016623, 2005], a conduit à de nouvelles méthodes en physique furtive. Avec son groupe, il a développé plusieurs domaines et concepts dans les domaines des métamatériaux et de l'optique plasmonique, notamment les métamatériaux « à paramètres extrêmes » et les métamatériaux ENZ [Phys. Rev. B 75 (15), 155410, 2007] ; il a contribué à l'émergence du domaine du graphène dans le domaine des métamatériaux et de l'optique plasmonique en régime infrarouge, fournissant les feuilles de route pour les dispositifs optiques d'un atome d'épaisseur et le traitement de l'information avec ces dispositifs ; il a joué un rôle déterminant dans les thématiques de la chiralité artificielle par micro-ondes, des métamatériaux « traitement du signal », des métamatériaux « numériques » et des « méta-machines ». Il est actuellement professeur H. Nedwill Ramsey à l'Université de Pennsylvanie, Philadelphie, Pennsylvanie, États-Unis, affilié aux départements de génie électrique et des systèmes, de bio-ingénierie, de science et d'ingénierie des matériaux, et de physique et d'astronomie. Il est membre de nombreuses sociétés scientifiques et techniques internationales. Ses activités de recherche actuelles couvrent un large éventail de domaines, notamment la nanophotonique, les métamatériaux, la plasmonique, l'optique à l'échelle nanométrique, l'optique au graphène, l'imagerie et la détection inspirées par les yeux de certaines espèces animales, la nano-ingénierie optique, la rupture de symétrie d'inversion de temps et la non-réciprocité, les antennes optiques et micro-ondes, les mathématiques des opérateurs fractionnaires, et la physique et l'ingénierie des champs et des ondes. Il a apporté des contributions pionnières dans les domaines de l'électromagnétisme et des micro-ondes, des métamatériaux, de l'optique de transformation, de l'optique plasmonique, de la nanophotonique, de la photonique du graphène, des nanomatériaux, de l'optique à l'échelle nanométrique, des nano-antennes et des antennes miniaturisées, de la physique et de l'ingénierie inverse de la vision de polarisation dans la nature, de l'imagerie optique bio-inspirée et du paradigme fractionnaire en électrodynamique.

Martin Wegener a obtenu son doctorat en physique en 1987 à Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt (Allemagne), puis il a passé deux ans en tant que chercheur au AT&T Bell Laboratories à Holmdel (États-Unis). De 1990 à 1995, il était professeur à l'Universität Dortmund (Allemagne) et, depuis 1995, il est professeur à l'Institut de physique appliquée de l'Institut de technologie de Karlsruhe (KIT). Depuis 2001, il occupe un poste conjoint en tant que chef de service à l'Institut de nanotechnologie du KIT. De 2001 à 2014, il était le coordinateur du DFG-Center for Functional Nanostructures (CFN) au KIT. Depuis 2019, il est

co-conférencier au centre d'excellence 3D Matter Made to Order. Ses intérêts de recherche comprennent l'optique ultrarapide, l'optique non-linéaire (extrême), l'optique en champ proche, la lithographie laser optique, les cristaux photoniques, les métamatériaux optiques, mécaniques et thermodynamiques, ainsi que la physique des transformations. Cette recherche a débouché sur différents prix et distinctions, parmi lesquels le SPIE Prism Award 2014 pour la start-up Nanoscribe GmbH. Au cours des quinze dernières années, son groupe de recherche a été particulièrement actif dans les thématiques des métamatériaux électromagnétiques [Science 306, 1351-1353, 2004; Science 328, 337-339, 2010], mécaniques [Appl. Phys. Lett. 100, 191901, 2012; Phys. Rev. Lett.108, 014301, 2012; Phys. Rev. Lett.108, 014301, 2014; Proceedings of the National Academy of Sciences 112, 4930-4934, 2015; Science 358, 1072-1074, 2017] et thermiques [Phys. Rev. Lett.110, 195901, 2013]. Muamer Kadic (actuellement enseignant-chercheur en physique à l'Université de Franche-Comté) a participé à de nombreux travaux de Wegener sur les métamatériaux mécaniques et thermiques. Wegener a de plus reçu le prix Descartes 2005 avec Sir John Pendry, David Smith (qui a rédigé des articles essentiels tels que la première preuve expérimentale de la réfraction négative [Phys. Rev. Lett. 84, 4184, 2000] et du camouflage micro-ondes [Science 314, 977-980, 2006]), Ekmel Ozbay et Kostas Soukoulis (qui ont apporté d'importantes contributions à la réfraction négative dite à tous angles avec des cristaux photoniques [Nature 423 (6940), 604-605, 2004], qui est un domaine de recherche en photonique initiée par un article théorique co-écrit par l'un de nous [J. Opt. Soc. Am. A 17, 1012-1020, 2000]).

Le prix Descartes 2005 de la recherche européenne a été décerné pour le développement de structures artificielles aux propriétés optiques entièrement nouvelles. En effet, l'Union européenne a reconnu que les équipes de recherche de ces éminents chercheurs ont créé et développé une nouvelle classe de métamatériaux artificiels, à l'époque appelés « matériaux gauchers », étant donné que la règle de base habituelle utilisée pour décrire le triplet (**E**, **H**, **k**) doit être effectuée avec la main gauche au lieu de la main droite comme c'est conventionnel. En effet, dans les milieux isotropes ordinaires à permittivité et perméabilité simultanément positives (d'où un indice de réfraction positif), le triplet (**E**, **H**, **k**) est direct et le vecteur d'onde **k** est parallèle au vecteur de Poynting **S**, qui est défini comme le produit vectoriel de **E** et **H**. Alors que pour une permittivité et une perméabilité simultanément négatives (d'où un indice de réfraction négatif selon l'article fondateur de Veselago [Sov. Phys. Usp. 10, 509, 1968]), le vecteur d'onde **k** change de direction et le triplet (**E**, **H**, **k**) devient indirect (et **k** et **S** deviennent anti-parallèles, et donc les vitesses de phase et de groupe pointent dans des directions opposées). Les milieux main-gauche sont maintenant généralement dénommés « matériaux à indice négatif » (NIM pour *negative index materials* en anglais), et leurs propriétés fascinantes comprennent la réfraction négative, les effets Doppler et Cerenkov inverses et la possibilité d'adaptation de l'impédance du vide (donc la transparence) comme l'a découvert Veselago il y a plus de 50 ans [Sov. Phys. Usp. 10, 509, 1968]. Mais les possibilités offertes par les NIM incluent également l'imagerie non limitée par la limite de diffraction comme l'a souligné Pendry il y a 20 ans [Phys. Rev. Lett. 85, 3966-3969, 2000]. La fabrication de NIM a ouvert la possibilité à de nouvelles applications et de nouveaux dispositifs, comme l'imagerie haute résolution et d'autres dispositifs sous-longueur d'onde, ainsi que des antennes et guides d'ondes miniatures, et des matériaux artificiels magnétiques et bianisotropes. Cependant, le prix Descartes 2005 ne mentionnait pas que les métamatériaux trouveraient d'énormes applications dans d'autres domaines de la physique. Par exemple, il a été souligné par Alexander Movchan et l'un de nous dans [Phys. Rev. B 70, 125116, 2004] que les résonateurs à anneau fendu peuvent être utilisés pour créer des bandes interdites basse fréquence en acoustique en raison du fait qu'ils se comportent comme des structures localement résonantes qui peuvent être modélisées par des ressorts et des masses, et peuvent donc former la base de milieux d'indice de réfraction

négatif en acoustique [New Journal of Physics 9, 399, 2007]. Une découverte similaire a été faite par Jensen Li et Che Ting Chan à peu près au même moment [Phys. Rev. E 70, 055602, 2004]. Cependant, c'est le groupe de Ping Sheng qui a dévoilé pour la première fois le véritable potentiel des matériaux sonores localement résonants dans un article marquant [Science 289, 1734-1736, 2000]. Le groupe de Martin Wegener a poussé l'analogie établie entre l'optique et la mécanique en introduisant le concept de métamatériaux mécaniques chiraux [Science 358, 1072-1074, 2017]. Ce dernier pourrait être la pierre angulaire d'une cape élastodynamique construite à partir d'un milieu Cossérat, comme proposé par le groupe de mathématiques appliquées d'Alexander Movchan à l'Université de Liverpool il y a plus de dix ans [Appl. Phys. Lett. 94, 061903, 2009]. Une autre possibilité pourrait être d'approcher les milieux dits Milton-Briane-Willis [New Journal of Physics, 8 (10), 248, 2006] avec des métamatériaux mécaniques chiraux [Phys. Rev. B 99, 214101, 2019].

Suite à l'essor du graphène, des nanotubes de carbone et autres nouveaux matériaux bidimensionnels, les chercheurs en métamatériaux ont porté un intérêt particulier à des composites qui s'apparentaient à ces matériaux bidimensionnels. Il est intéressant de noter ici quelques liens avec les travaux de Thomas Ebbessen qui est professeur de chimie physique à l'Université de Strasbourg en France. Ebbessen est connu pour ses travaux pionniers dans le domaine des nanosciences. Il a reçu le prix Kavli 2014 en nanosciences pour ses contributions transformatrices au domaine de la nano-optique qui ont brisé des certitudes de longue date sur les limites de résolution de la microscopie optique et de l'imagerie, avec Stefan Hell (prix Nobel de chimie 2014), et John Pendry. En 2019, Ebbessen a reçu la médaille d'or du CNRS en France. Alors qu'il travaillait pour la société NEC à la fin des années quatre-vingt, Ebbesen a découvert qu'il était possible, dans certaines conditions de résonance, de transmettre la lumière à travers des trous de dimension sous-longueur d'onde fraisés dans des films métalliques opaques. Le phénomène, connu sous le nom de transmission optique extraordinaire, implique des plasmons de surface. Les plasmons de surface restent un domaine de recherche très actif, avec d'éminents chercheurs comme Stefan Maier [Plasmonics: fundamentals and applications Springer Science & Business Media, 2007], qui a commencé sa carrière en travaillant avec Harry Atwatter au California Institute of Technology, publiant notamment un article qui fait date sur la détection locale du transport d'énergie électromagnétique sous la limite de diffraction dans les guides d'ondes plasmoniques à nanoparticules métalliques [Nature Materials 2, 229-232, 2003] et qui occupe actuellement un poste de professeur à l'Imperial College de Londres et à la Ludwig-Maximilian Universität München. Notons que Stefan Maier a publié de nombreux articles avec John Pendry et Paloma Huidobro (une jeune chercheuse extrêmement talentueuse qui a récemment rejoint le groupe de Mario Silveirinha à Lisbonne) sur le contrôle des polaritons de plasmon de surface à l'aide d'outils de transformation optique ainsi que sur l'optique de graphène.

Federico Capasso est un contributeur majeur dans le domaine des métasurfaces. Il a reçu le doctorat en physique de l'Université de Rome en 1973 pour ses recherches sur la fibre optique, et il a rejoint les Bell Labs en 1976. En 1984, il a été nommé membre distingué du personnel technique et, en 1997, Bell Labs *Fellow*. Il a rejoint l'Université de Harvard en tant que professeur de physique appliquée en 2003. Capasso et ses collaborateurs ont apporté de nombreuses contributions de grande envergure aux dispositifs à semi-conducteurs, avec des travaux pionniers sur la technique de conception connue sous le nom d'« ingénierie de structure de bande ». Il l'a appliqué à de nouvelles photodiodes à cascade quantique à faible bruit, à des transistors à hétérojonction, à des dispositifs de mémoire et à des lasers. Capasso et ses collaborateurs ont inventé et démontré le laser à cascade quantique (QCL) [Science 264, 553-556, 1994]. Le groupe de Capasso a montré que des interfaces plasmoniques, astucieusement

conçues et constituées de réseaux optiquement minces de nano-antennes optiques, conduisaient à une puissante généralisation des lois séculaires de la réflexion et de la réfraction. Ces structures sont au fondement de l'optique planaire basée sur les métasurfaces, que Capasso a popularisé [Science, 334, 333-337, 2011 ; Nature Materials 13, 139-150, 2014] bien au-delà de la communauté photonique.

Philippe Lalanne, qui est Directeur de Recherche CNRS à l'Institut d'Optique d'Aquitaine, peut certainement être inclus dans les chercheurs pionniers sur les métasurfaces avec ses travaux qui font date sur la théorie des milieux effectifs des structures périodiques sous-longueur d'onde, 1996] et sur des réseaux binaires blazés sous-longueur d'onde [Optics Letters 23, 1081-1083, 1998]. Lalanne a également apporté des contributions essentielles à la modélisation numérique électromagnétique en améliorant la convergence de la décomposition de Fourier pour les structures périodiques [J. Opt. Soc. Am. A 13, 779-784, 1996] et à la photonique avec la théorie de la transmission optique extraordinaire [Nature 452, 728-731, 2008]. Il a été impliqué dans l'électrodynamique computationnelle et dans les applications de structures optiques sous-longueur d'onde pour l'optique diffractive, la plasmonique, les cristaux photoniques, l'optique intégrée et les microcavités.

Comme déjà mentionné, les métamatériaux ne peuvent se résumer à des composites rationnellement conçus avec une certaine hétérogénéité spatiale. On peut également concevoir les propriétés des matériaux en exploitant la variable de temps. Ici, nous voudrions citer un chercheur dont le nom est associé aux miroirs à inversion temporelle.

Mathias Fink a obtenu en 1978 le Doctorat en Sciences de l'Université de Paris dans le domaine de la focalisation ultrasonore pour l'imagerie médicale en temps réel sous la direction de Pierre Alais. En 1981, il est nommé professeur à l'Université de Strasbourg. Après un séjour en tant que professeur invité à l'Université d'Irvine dans le département de radiologie, il revient en France pour devenir professeur à l'Université Paris Diderot (Paris 7). En 1990, il fonde le Laboratoire Ondes et Acoustique de l'Ecole Supérieure Physique Chimie Industrielle (ESPCI) à Paris, laboratoire qui composera l'Institut Langevin en 2009. En 2005, il est nommé professeur à l'ESPCI, où il est aujourd'hui professeur émérite et titulaire de la chaire Georges Charpak (du nom du physicien français d'origine polonaise, qui a occupé la chaire Joliot-Curie à l'ESPCI et a reçu le prix Nobel de physique en 1992 pour son invention et le développement de détecteurs de particules). Fink a été le pionnier du développement de miroirs à inversion temporelle et du traitement du signal par inversion temporelle [Europhysics Journal Physics 15, 81, 1994 ; Wave Motion 20, 151, 1994 ; Phys. Rev. Lett. 79, 3170, 1997]. Il a développé de nombreuses applications de ce concept, de la thérapie par ultrasons, l'imagerie médicale, les tests non destructifs, l'acoustique sous-marine, l'imagerie sismique, les objets tactiles, jusqu'aux télécommunications électromagnétiques. Il a également été le pionnier des méthodes d'imagerie médicale innovantes : élastographie transitoire, imagerie par cisaillement supersonique et imagerie multi-ondes qui sont maintenant mises en œuvre par plusieurs entreprises. Six entreprises comptant environ 400 employés ont été créées à partir de ses recherches : Echosens, Sensitive Object, Supersonic Imagine (qu'il a cofondée notamment avec Charpak), Time Reversal Communications, Cardiawave et GreenerWave. Notons que Philippe Roux, directeur de recherche au CNRS et actuellement directeur de l'Institut des Sciences de la Terre ISTERRE à Grenoble, a apporté d'importantes contributions aux métamatériaux sismiques [Rapports Scientifiques 6, 19238, 2016 ; Geophysical Journal International 220, 1330-1339, 2020] et est un ancien doctorant de Fink. Les métamatériaux sont un petit monde allant de l'ultrasonique à la géophysique.

Un autre contributeur important dans le domaine des métamatériaux sismiques est Stéphane Brûlé, chercheur en évaluation du risque sismique, interaction sol-structure, qui est également ingénieur géotechnique en chef, titulaire d'un master recherche de l'Ecole Normale Supérieure de Paris et de l'Université Pierre et Marie Curie et diplômé ingénieur en géotechnique de l'Université Grenoble-Alpes dans le domaine de la mécanique des sols, de l'amélioration des sols et des fondations profondes. Brûlé est l'auteur principal de l'article fondateur pour le domaine des métamatériaux sismiques [Physical Review Letters 112, 133901, 2014] qu'il a co-écrit avec Emmanuel Javelaud (qui était en 2012 ingénieur et chercheur dans le groupe de recherche de Brûlé chez Ménard), Stefan Enoch (directeur de recherche au CNRS) et l'un de nous. Il a également dirigé la première expérience de focalisation des ondes de Rayleigh de surface par réfraction négative [Scientific Reports 7, 18066, 2017]. Il est membre du Comité technique international 203 « Génie géotechnique sismique et problèmes associés », est également membre du Comité français de mécanique des sols (CFMS) et de l'Association française du génie parasismique (AFPS).

Enfin, dans les traces de Lord Rayleigh, d'éminents chercheurs travaillant en mathématiques appliquées et en mécanique théorique ont contribué au développement des métamatériaux. Nous avons déjà cité de nombreux chercheurs célèbres (dont certains apparaîtront dans la suite car ils sont contributeurs de ces deux doubles volumes spéciaux). Néanmoins, nous sommes bien conscients que de nombreux grands scientifiques n'apparaissent pas dans notre préface, et nous tenons à nous en excuser. Mais essayer d'être plus exhaustif nous conduirait bien au-delà de la portée de cette préface. Mentionnons donc simplement Alain Bensoussan, Jacques-Louis-lions et Georges Papanicolaou pour leur livre historique sur la théorie de l'homogénéisation [Analyse asymptotique pour les structures périodiques, Hollande du Nord, 1978], et Habib Ammari, Allan Greenleaf, Robert Kohn, Michael Vogelius et Michael Weinstein pour leur contribution fondamentale à la théorie mathématique du camouflage, et des membres du laboratoire de mathématiques POEMS d'Anne-Sophie Bonnet Ben-Dhia à l'ENSTA à Palaiseau, laboratoire de référence pour les travaux de recherche sur les coins constitués d'un matériau dispersif en fréquence qui partagent certaines caractéristiques avec la physique des trous noirs. Notre liste est évidemment loin d'être exhaustive et nous tenons à nous excuser d'avoir manqué d'autres chercheurs éminents. Portons cependant une attention particulière au travail de deux mathématiciens, car les derniers développements des métamatériaux modulés spatialement et temporellement pointent vers leur travail fondateur. Konstantin Lurie a obtenu une maîtrise en sciences de l'Institut polytechnique de Leningrad en 1959 et un doctorat de l'Institut physico-technique cinq ans plus tard. Il a obtenu l'équivalent du « Doctorat d'Etat » du même institut en 1972. Ses recherches se consacrent depuis les années 60 à la conception optimale des matériaux. Les journaux et livres qu'il a publiés ont jeté les bases mathématiques de cette discipline telle que nous la connaissons aujourd'hui. Le besoin d'une conception optimale provient de diverses exigences technologiques telles que des dispositifs, qui sont produits avec une meilleure qualité, moins de poids, à moindre coût et avec une fabrication plus rapide. Comme l'explique Lurie, il existe des liens étroits entre la conception optimale et la physique, la mécanique, la biologie et les sciences naturelles en général. L'optimalité englobe de nombreux domaines tels que les systèmes de communication et la conception nanostructurale ou le contrôle du trafic. On note qu'Andrej Cherkaev, autre acteur clé de la théorie des composites, a contribué à quelques travaux avec Konstantin Lurie, y compris un travail historique que ces chercheurs ont publié avec Graeme Milton et Marco Avellaneda sur la conductivité des polycristaux et une inégalité d'échange de phase [Physica A: Statistical Mechanics and its Applications 157, 148-153, 1989]. Lurie a extrapolé ces principes à la dynamique des matériaux en introduisant un nouveau concept de matériaux dynamiques [An Introduction to the Mathematical Theory of Dynamic Materials, Springer, 2007], et de cette

manière il a jeté les bases mathématiques de métamatériaux aux propriétés variables dans l'espace et le temps. Les métamatériaux spatio-temporels sont devenus un domaine en développement rapide des métamatériaux.

John Willis est professeur émérite de mécanique théorique des solides à l'Université de Cambridge. Il est diplômé du département de mathématiques de l'Imperial College de Londres où il a été assistant-conférencier en 1962-1964, avant de travailler en tant qu'associé de recherche au Courant Institute de New-York pendant un an. De 1965 à 1972, il a été directeur de recherche au Département de mathématiques appliquées et de physique théorique (DAMTP) de l'Université de Cambridge, puis professeur de mathématiques appliquées à l'Université de Bath jusqu'en 1994. Il était de retour en tant que professeur de mécanique théorique des solides à la DAMTP de 1994 à 2007, ainsi que professeur de mécanique à l'Ecole Polytechnique de 1998 à 2004. Il a été rédacteur en chef du Journal of Mechanics and Physics of Solids pendant un quart de siècle (de 1982 à 2006). Les principaux intérêts de recherche de Willis ont inclus les problèmes statiques et dynamiques pour les milieux anisotropes, les problèmes de dommages par irradiation des matériaux, l'intégrité structurelle, les propriétés efficaces des matériaux composites (à la fois statiques et dynamiques), la mécanique des composites non linéaires, la stabilité des dispositifs semi-conducteurs à couche contrainte. Des travaux récents ont porté sur la plasticité du gradient de déformation et la dynamique des composites (appliquée aux métamatériaux acoustiques). Il a été élu Fellow de la Royal Society en 1992, membre étranger de la US National Academy of Engineering (2004) et membre Associé Etranger de l'Académie des Sciences (2009). Les milieux dits de Willis, du nom de son article fondateur sur les méthodes variationnelles et connexes pour les propriétés globales des composites qui ont conduit à de nouvelles équations de gouvernance pour les ondes élastodynamiques se propageant dans des milieux hétérogènes [Advances in Applied Mechanics, 21, 1-78, 1981], sont un domaine des métamatériaux élastiques avec une activité de recherche très intense. Willis a publié des travaux importants sur l'interprétation dynamique de l'instabilité du flottement (flutter) dans un milieu continu, [J. Mech. Phys. Solids 54, 2391-2417, 2006], ainsi qu'un article de référence sur les modifications de la deuxième loi de Newton et de l'élastodynamique continue linéaire, qu'il a co-écrit avec Graeme Milton, un autre mathématicien éminent [Proc. Roy. Soc. A 463, 855-880, 2007].

Comme nous l'avons suggéré avec les « métamathématiques » de David Hilbert, les métamatériaux sont un sujet à l'interface entre la physique et les mathématiques (nonobstant l'importance des sciences de l'ingénieur qui sera montrée ensuite dans la préface). Nous sommes honorés d'avoir le polymathe Graeme Milton comme contributeur de ce volume spécial, actuellement professeur émérite à l'Université de l'Utah et également professeur au Courant Institute of Mathematical Sciences à New-York. Lorsqu'il était étudiant en Master à l'Université de Sydney, il a publié un article fondateur sur les limites sur la constante diélectrique complexe d'un matériau composite [Appl. Phys. Lett. 37, 300-302 (1980)], qui jette les bases de la théorie des limites dite de Bergmann-Milton. La thèse de Milton portait sur « Les études théoriques des propriétés de transport des supports inhomogènes », sous la direction de Ross McPhedran qui l'introduisit dans le domaine des matériaux composites, aboutissant à la publication susmentionnée qui a reçu selon Milton plus de demandes de réimpression que tout autre de ses articles ultérieurs. Il a fait sa thèse de doctorat sur certains modèles exotiques en physique statistique au département de physique de l'Université Cornell avec Michael Fisher, puis un post-doctorat avec Michael Cross à Caltech en tant que Weingart Fellow, et George Papanicolaou (qui a co-écrit avec Alain Bensoussan et Jacques-Louis Lions le livre classique sur la théorie de l'homogénéisation [Asymptotic Analysis of Periodic Structures, North-Holland, New-York, 1978]) lui a suggéré de postuler pour un poste de professeur adjoint au

Courant Institute, où il a obtenu son poste et a été promu professeur associé après deux ans, puis professeur. Il y a 25 ans, il publiait avec son collègue Andrej Cherkaev un article de rupture intitulé « Quels tenseurs d'élasticité sont réalisables ? » [Journal of Eng. Mat. and Technology 117, 483-493, 1995], qui a introduit une toute nouvelle classe de composites aux propriétés élastiques sans précédent. Les médias dits « Pentamode » sont devenus réalité il y a six ans grâce au groupe de Martin Wegener [Phys. Rev. Appl. 2, 054007, 2014]. En 1999, il est devenu professeur émérite du département de mathématiques de l'Université de l'Utah et a été directeur de ce département de 2002 à 2005. Il a publié un ouvrage qui est devenu un classique [The Theory of composites, Cambridge University Press, Cambridge, 2002] qui fait écho à celui de Bensoussan, Lions et Papanicolaou. Ces deux livres serviront encore d'inspiration aux physiciens et mathématiciens travaillant dans le domaine des métamatériaux pour les années à venir.

Les changements de paradigmes de la réfraction négative et du camouflage ont alimenté l'intérêt pour les métamatériaux. Jusqu'à présent, nous avons présenté d'éminents chercheurs dans ce domaine, dont les travaux sont cités dans les 14 articles de ces deux doubles volumes spéciaux. Cependant, en tant que rédacteurs invités des Comptes Rendus Physique, nous avons le grand plaisir de réunir dans ce volume spécial les contributions d'autres chimistes, physiciens et mathématiciens distingués et extrêmement talentueux qui ont également apporté des contributions majeures au domaine des métamatériaux.

Par ordre alphabétique, nous commençons par Andrea Alù qui a obtenu un doctorat de l'Université de Roma Tre en 2007. Après avoir passé un an en tant que chercheur postdoctoral à travailler avec le professeur Nader Engheta à l'Université de Pennsylvanie, Philadelphie, en 2009, il a rejoint la faculté de l'Université du Texas à Austin où il est actuellement chercheur principal et professeur associé. Il a rejoint la City University New-York en 2018 en tant que professeur et directeur fondateur de la Photonics Initiative pour l'Advanced Science Research Center. Il reste affilié au Laboratoire de recherche appliquée de l'Université du Texas à Austin, où il est impliqué dans des projets de recherche sur l'électromagnétisme et l'acoustique. Ses sujets actuels de recherche couvrent un large éventail de domaines, y compris les métamatériaux et la plasmonique, l'électromagnétique, l'optique et la photonique, la diffusion, le camouflage et la transparence [Phys. Rev. E 72, 016623, 2005], la modélisation des nanocircuits et des nanostructures, les antennes miniaturisées et les nanoantennes, les antennes circuits en radio-fréquence, les dispositifs acoustiques et mécaniques en métamatériaux. Alù est l'actuel président de l'Institut virtuel européen METAMORPHOSE pour « *Les matériaux électromagnétiques artificiels et les métamatériaux* », et membre du comité administratif de l'IEEE Antennas and Propagation Society. Depuis 2014, Alù est également directeur de la technologie chez Silicon Audio RF Circulator, une société qui détient la licence exclusive de quelques inventions issues du laboratoire d'Alù autour de la technologie non-magnétique pour les dispositifs non réciproques.

Yuri Kivshar a étudié à l'école de Kharkiv fondée par le lauréat du prix Nobel Lev Landau. En 1984, il a obtenu un doctorat en sciences et en 1989, à 30 ans, il est devenu le plus jeune chercheur du Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering. À partir de 1991, il a travaillé comme scientifique aux États-Unis, en Finlande, en Espagne, en Allemagne et en 1993, il a été invité à l'Optical Sciences Center of Australia et a ensuite fondé son propre laboratoire Nonlinear Physics Center de l'Australian National University. À partir de 2000, Yuri Kivshar a travaillé dans différents domaines de l'optique non linéaire et a mené des recherches sur les solitons et les métamatériaux, les cristaux photoniques non linéaires et les théories des matériaux composites. Ses recherches ont eu un impact fondamental sur l'effet d'auto-

focalisation, les métamatériaux, les nano-antennes diélectriques, les isolateurs topologiques, le traitement du signal optique et les communications optiques. Il a également découvert des séries de solitons et décrit leurs propriétés dynamiques dans des systèmes presque intégrables. En 2010, Yuri Kivshar a été invité à Saint-Pétersbourg grâce au programme gouvernemental Megagrant. Il est devenu un responsable scientifique du Centre international de recherche en nanophotonique et métamatériaux de l'Université ITMO (Saint-Pétersbourg, Russie). Tout au long de sa carrière exceptionnellement prolifique, Yuri Kivshar a apporté des contributions majeures à de nombreux domaines de la physique et il a également contribué à la diffusion d'idées d'optique non linéaire dans les cristaux photoniques et les métamatériaux, notamment à travers l'ouvrage devenu un classique qu'il a co-écrit avec Govind Agrawal [Solitons optiques : des fibres aux cristaux photoniques, Academic press, New-York, 2003]. Enfin, le travail de Yuri Kivshar a reçu plus de 80 000 citations selon Google Scholar (avec un h-index de 130), ce qui suggère le profond impact de son travail dans le domaine de la photonique. Par ailleurs, il a développé un nombre incroyable de collaborations avec des groupes de recherche dans le monde entier. Son extraordinaire vie scientifique rappelle ainsi celle du mathématicien Paul Erdôs qui a publié des travaux avec plus de 500 collaborateurs, ce qui a suscité la création du nombre d'Erdôs, le nombre d'étapes du chemin le plus court entre un mathématicien et Erdős en termes de co-paternités.

Ross McPhedran a terminé ses études de premier cycle et son doctorat à l'Université de Tasmanie, avant de déménager à Sydney en 1975 en tant que boursier de la reine Elizabeth II. Il a été nommé professeur assistant à la School of Physics (École de physique) de Sydney University en 1984 et a été promu à une chaire personnelle en 1994. Ses intérêts couvrent de nombreux aspects de la théorie des ondes, de la photonique, des fibres microstructurées, de l'élastodynamique, de la science des composites, des méthodes mathématiques et des algorithmes numériques. McPhedran a apporté des contributions fondamentales au domaine de la science des ondes, ses techniques et ses applications. Ses travaux ont fourni des méthodes d'une précision et d'une compréhension sans précédent qui ont permis des développements majeurs dans les performances des fibres optiques microstructurées, des matériaux composites, des réseaux de diffraction, des cristaux photoniques et platoniques (ces derniers sont des plaques minces périodiques baptisées platoniques par McPhedran peut-être en référence à Platon, le philosophe athénien de la Grèce antique). La formulation multipolaire a été développée comme un outil majeur pour résoudre les problèmes de diffraction impliquant des ondes électromagnétiques et élastiques avec des systèmes périodiques infinis et finis pour des applications telles que la spectroscopie et la conversion d'énergie photovoltaïque et photothermique. Les outils associés des « *lattice sums* », de la densité des fonctions d'état, de l'analyse des modes et des défauts ont une compréhension et des méthodologies avancées de la science des ondes. Ross McPhedran a joué un rôle central dans la carrière de nombreux chercheurs scientifiques, dont l'un d'entre nous. Il s'est attaqué au cours de sa carrière exceptionnelle à des problèmes allant de la physique appliquée [Physics World 26, 32, 2013] aux mathématiques pures [https://arxiv.org/pdf/2003.14241.pdf].

Nous avons présenté quelques-uns des scientifiques éminents des sciences physiques, mathématiques et de l'ingénierie, qui à notre avis ont façonné le domaine des métamatériaux et la théorie des composites en général. Nous ne prétendons pas être exhaustifs car la liste des scientifiques éminents qui ont contribué aux métamatériaux est vaste : cette liste ne reflète que l'opinion des éditeurs invités. Cependant, comme souvent en sciences, les avancées de la recherche sont l'œuvre de nombreux individus et groupes qui contribuent à la diffusion et à l'amélioration des grandes idées de quelques heureux élus. Rappelons un autre point de l'histoire

qu'à la fin des années 1940, Winston Kock d'AT & T Bell Laboratories ont développé des matériaux qui avaient des caractéristiques similaires aux métamatériaux. Dans les années 1950 et 1960, des diélectriques artificiels ont été étudiés pour des antennes micro-ondes légères. Par la suite, les absorbeurs de radar à micro-ondes ont été étudiés dans les années 1980 et 1990 comme applications pour les milieux chiraux artificiels. Ces dispositifs peuvent être considérés comme des milieux complexes avec des propriétés inhabituelles rationnellement conçues, ils sont donc englobés par notre définition des métamatériaux (et aussi celle de Wegener).

Depuis 1999, les chercheurs qui ont contribué à ce domaine des métamatériaux comprennent des mathématiciens purs et appliqués, des physiciens théoriques et appliqués, mais aussi des chimistes, des biologistes, des ingénieurs en mécanique et aussi des géophysiciens. Par conséquent, les métamatériaux électromagnétiques ne sont qu'un côté de la médaille. En effet, les correspondances entre les équations régissant les ondes électromagnétiques et les ondes acoustiques, élastodynamiques et hydrodynamiques ont permis de traduire des phénomènes inhabituels découverts en électromagnétisme vers d'autres domaines et de trouver des applications passionnantes. Par exemple, la cape d'invisibilité proposée par Pendry et ses collègues [Science 312, 1780-1782, 2006] pour montrer le véritable potentiel du contrôle du champ électromagnétique par les métamatériaux, a ensuite été conçue pour les ondes de pression et pourrait améliorer l'acoustique des salles de concerts par des colonnes acoustiquement dissimulées. L'un de nous a même proposé que les métamatériaux sismiques puissent fournir une protection contre les tremblements de terre en détournant les ondes sismiques avec une gigantesque cape d'invisibilité semblable à la cape proposée par Pendry pour les ondes électromagnétiques. Associées à la conception ou à la création de dispositifs, de nombreuses questions conceptuelles intéressantes se posent naturellement, par exemple la question récurrente du principe de réciprocité : si la lumière ne peut atteindre un personnage fictif couvert par une cape d'invisibilité, peut-il voir le monde extérieur ? En fait, il ou elle serait dans l'obscurité totale si la cape n'avait pas de trous pour les yeux ; ces deux défauts de la cape pourraient alors être perçus par un observateur extérieur. De même dans d'autres systèmes d'ondes, il faut penser aux conséquences de tels capes ou dispositifs, par exemple, la région d'invisibilité devrait agir comme une zone de calme si l'on devait concevoir une cape pour les ondes acoustiques ou sismiques.

Jusqu'à présent, les physiques de la réfraction négative et du camouflage (c'est-à-dire des capes d'invisibilité) semblent dissociées, mais elle se retrouvent dans la théorie du camouflage externe proposée par Graeme Milton et Nicolae Nicorovici [Proc. Roy. Soc. A : Mathematical, Physical and Engineering 462, 3027-3059, 2006]. Dans cette approche, la cape d'invisibilité consiste en une coquille à réfraction négative et, de plus, l'objet à dissimuler se trouve à l'extérieur du manteau ! La conception d'une cape externe est radicalement différente de celle proposée par Pendry, puisque cette dernière est basée sur les caractéristiques anisotropes de la coquille (ou cape) entourant l'objet à cacher. Elle défie les arguments du principe de réciprocité mentionnés ci-dessus, puisque le personnage fictif n'est plus entouré par la cape, mais il vit pour ainsi dire dans une région repliée dans l'espace, appelée feuille de Riemann, qui n'est pas détectée par la lumière qui éclaire la cape externe et le personnage fictif. Une autre physique contre-intuitive est celle des isolants topologiques, qui sont des milieux complexes qui supportent une foule d'états de surface protégés grâce à des propriétés topologiques, et qui sont également englobés par notre définition des métamatériaux.

Ces deux doubles volumes spéciaux des Comptes Rendus Physique 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 ensembles 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 le premier des deux volumes doubles, la première série de sept articles commence par une présentation de la physique des matériaux à indice négatif à la frontière de l'électromagnétisme macroscopique, par l'un de nous. Dans cette contribution, les nouveaux phénomènes et questions apportés par la réfraction négative, les indices négatifs, la lentille plate parfaite et les structures en coin sont discutés dans le cadre de l'électromagnétisme macroscopique. Dans le prolongment, un analogue du phénomène de « trou noir » est mis en évidence dans de simples structures en coin remplies d'un matériau de de permittivité avec dispersion en fréquence et des arguments sont fournis pour soutenir que, dans les milieux passifs, la partie imaginaire de la perméabilité magnétique peut prendre des valeurs positives et négatives.
Il est suivi d'un article sur l'homogénéisation avec une application aux milieux filaires par Mario Silveirinha *et al.*, qui présente un aperçu d'une théorie d'homogénéisation pour les métamatériaux périodiques. Cette approche générale *ab initio* peut être considérée comme une extension aux métamatériaux périodiques du cadre développé pour établir les équations de l'électromagnétisme macroscopique et représente une approche physique remarquable aux théories d'homogénéisation habituelles établies en mathématiques appliquées. L'approche proposée est appliquée à divers cas de milieux filaires électromagnétiques, bidimensionnels et tridimensionnels, permettant de mettre en évidence une variété de phénomènes exotiques et notamment l'effet de la dispersion spatiale.
L'article suivant sur l'optique de transformation pour la plasmonique, par Paloma Huidobro et Antonio Fernandez-Dominguez, passe en revue les dernières avancées théoriques dans l'application de l'optique de transformation pour la description théorique des structures plasmoniques sous-longueur d'onde. Cet article commence par une introduction à la technique de l'optique de transformation. La technique est notamment appliquée à la conception de métasurfaces à géométries singulières, obtenues en cartographiant un volume infini étendu sur une nanoparticule plasmonique, qui permettent une absorption large bande et fournissent une plateforme pour l'étude de la dispersion spatiale. La technique est également exploitée pour déterminer analytiquement le couplage d'un émetteur quantique avec des nanoparticules plasmoniques.
L'article de Graeme Milton et Ross McPhedran est un état de l'art de la résonance anormale, du camouflage associé et de la super focalisation. Les auteurs adoptent un point de vue original et intéressant sur l'histoire du camouflage externe et de la super focalisation, alternatif à ceux que l'on trouve généralement dans la littérature, basé sur la découverte en 1994 des notions de sources fantômes et de résonances anormales. Cet article théorique apporte une belle introduction au camouflage dû à des milieux complémentaires en régime quasi-statique avec des analyses fines des résonances anormales, du camouflage et de la super focalisation dans la limite lorsque l'absorption tend vers zéro.
L'article suivant sur la métaphotonique tout diélectrique à base de résonances de Mie, par Nicolas Bonod et Yuri Kivshar, tire les avantages des structures sous-longueur d'onde tout diélectrique par rapport à leurs homologues plasmoniques. Cet article commence par une revue des résonances électriques et magnétiques à faible ordre multipolaire conduisant, sans métaux,

à un magnétisme optique artificiel et à une perméabilité effective négative. Ensuite, il est montré comment ces résonances peuvent être utilisées pour obtenir l'effet Kerker et les conditions de Kerker à partir de particules diélectriques, ou concevoir une nanoantenne tout diélectrique pour l'amélioration de la force d'excitation des émetteurs quantiques. Ce concept de résonances diélectriques est appliqué à la conception de métasurfaces tout diélectriques pour « les états liés dans le continuum » (*bound states in the continuum* en anglais) et pour générer des couleurs et des hologrammes.
Philippe Barois *et al.* apportent une contribution sous forme d'un article de synthèse sur les métamatériaux nanocolloïdaux « ascendants » (*bottom-up* en anglais) aux fréquences optiques. Cet article, principalement expérimental, rend compte de la conception et de la fabrication, à partir d'assemblages de méta-atomes nanocolloïdaux, de métamatériaux tridimensionnels dans le domaine du visible. Les métamatériaux sont en outre caractérisés en termes de permittivité et de perméabilité effectives. Les deux types de métamatériaux impliquant des résonances plasmoniques ou de Mie sont abordés, montrant pour chacun leurs avantages et leurs inconvénients. Les métasurfaces pour les optiques plates et les applications d'absorbeurs parfaits sont également abordées.
La dernière contribution de cette première série d'articles, par Romain Fleury, Andrea Alù et Farzad Zangeneh-Nejad, aborde le sujet émergent des isolants topologiques. Cet article de synthèse commence par l'exemple canonique, monodimensionnel, du modèle Su-Schrieffer-Heeger (SSH), avant d'aborder des situations bidimensionnelles, en présentant des analogues d'ondes classiques des isolants topologiques de Chern, de Hall quantique, de spin-Hall, de Valley-Hall et de Floquet. Les développements les plus récents sont également passés en revue. Cet article dessine un sujet de recherche interdisciplinaire remarquable avec la transposition de concepts, découverts à l'origine dans les systèmes de matière condensée, à la physique des ondes classiques en photonique, micro-ondes, phononique, acoustique et mécanique.

Dans le 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 métasufaces 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 du second double volume spécial, par Stéphane Brûlé de la société Ménard 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.

En conclusion, ces deux doubles volumes spéciaux des Comptes Rendus Physique abordent de nombreux sujets d'actualité en physique des métamatériaux acoustiques, élastiques et électromagnétiques, découverts il y a moins d'un quart de siècle. Ce volume couvre aussi bien les aspects théoriques qu'expérimentaux dans ces différents domaines de l'échelle nanométrique (optique et plasmonique) à l'échelle du mètre (génie civil en sismique) en passant par les micro-ondes, l'acoustique et la mécanique. Des sujets émergents tels que les isolants topologiques et de nombreuses applications prometteuses des métasurfaces ont été abordés. Les quatorze articles constituant ces deux volumes doubles donnent un aperçu complet des progrès récents dans ce domaine mature. Il reste encore beaucoup à découvrir et l'avenir sera sans aucun doute passionnant. Nous espérons que cette collection d'articles contribuera à stimuler les efforts

théoriques et expérimentaux en métamatériaux. Nous soulignons que toutes ces contributions promettent de révolutionner les moyens de contrôler la propagation du son, de la lumière et de toute forme particulière d'ondes à des échelles macroscopiques et microscopiques. En effet, les applications potentielles vont de la lentille sous-longueur d'onde et des guides d'ondes optiques, aux biocapteurs et au contrôle total de l'ellipticité de la lumière, à l'exaltation des émetteurs quantiques et aux interactions non linéaires, à l'optique planaire et à l'affichage holographique, à l'absorption parfaite en acoustique et aux antennes de métasurface, au camouflage sous-marin et à l'invisibilité électromagnétique, à la manipulation de la lumière visible et à la protection contre les ondes physiques délétères (par exemple, les tsunamis et les tremblements de terre).

Nous remercions chaleureusement tous les auteurs, qui sont les principaux architectes de ce volume spécial des Comptes Rendus Physique publié par l'Académie des Sciences, pour leurs excellentes contributions scientifiques et leur volonté de partager leurs connaissances des mathématiques et de la physique des métamatériaux. L'assistance et le professionnalisme des équipes du Centre Mersenne et des Comptes Rendus de l'Académie des Sciences sont également vivement remerciés. Enfin, nous sommes profondément redevables à Denis Gratias, pour son vif intérêt pour le sujet des métamatériaux et ses encouragements constants à travers la préparation de ce volume, en particulier lors de la dernière étape qui a eu lieu lors de la pandémie de covid-19 en Europe. Nous espérons que vous apprécierez la lecture de ces articles et que vous les trouverez aussi inspirants que nous.

Boris Gralak
Institut Fresnel, CNRS
CNRS, Aix Marseille Univ, CentraleMarseille, Institut Fresnel,Marseille, France
E-mail address : boris.gralak@fresnel.fr

SUMMARY

Boris Gralak is a 1997 graduate engineer of Ecole Polytechnique, received in 2001 the PhD degree of Universtité 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 Nederlands 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.

Boris Gralak est ingénieur de l'Ecole 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
UMI 2004 Abraham de Moivre-CNRS, Imperial College London, London SW7 2AZ, United Kingdom
E-mail address : s.guenneau@imperial.ac.uk

SUMMARY

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.

Sébastien Guenneau est directeur de recherche au Centre National de la Recherche Scientifique. Il a rejoint l'Unité Mixte Internationale CNRS-Impérial 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.