

2020-2021

Etude théorique et numérique des cristaux photoniques modulés spatio-temporellement

Co-directeurs de thèse

Boris Gralak, Directeur de recherche au CNRS
Institut Fresnel, Marseille
Adresse mail : boris.gralak@fresnel.fr

Guenneau Sébastien, Directeur de recherche au CNRS
UMI 2004 Abraham de Moivre, Londres
Adresse mail : s.guenneau@imperial.ac.uk

Laboratoire d'accueil : Institut Fresnel, équipe Epsilon

Financement de la thèse : CNES & DGA

Candidatures : avant le 31 mars à boris.gralak@fresnel.fr et s.guenneau@imperial.ac.uk

Descriptif du sujet

Contexte : Métasurface, modulation spatio-temporelle

La physique de la réfraction négative a ouvert une voie inédite il y a une quinzaine d'année vers des résonateurs ouverts (alternant des régions d'indice positif et négatif) au sein desquels la lumière tourne en boucle et la densité locale d'état diverge [1]. Il résulte de ces objets insolites appelés « coins parfaits » (par analogie avec la lentille parfaite de John Pendry) la possibilité d'applications encore théoriques mais très variées pour ces systèmes de type cloaking (un coin parfait est parfaitement adapté à l'air donc transparent) mais aussi de type cavité parfaite (la lumière émise par une source dans le coin parfait met un temps infini pour s'en extraire).

Un autre type de métamatériau parfaitement adapté à l'air (donc transparent) a été étudié par John Pendry et ses collègues : il s'agit d'un cristal modulé en espace et en temps de façon identique pour la permittivité et la perméabilité [2], ce qui conduit à un système avec une non-réciprocité induite par la flèche du temps analogue à la trainée de Fresnel [2]. Cette étude s'appuie sur un modèle homogénéisé bianisotrope qui n'est pas sans rappeler une étude précédente [3]. Le plus souvent, cette variation temporelle est associée à une variation spatiale de la structure considérée (par exemple grâce à une métasurface) : on parlera alors de modulation spatio-temporelle [4], mais on peut imaginer de ne moduler qu'en temps, auquel cas un simple morceau de verre passerait de la transparence à l'opacité en créant des bandes interdites temporelles !

[1] S. Guenneau, B. Gralak and J.B. Pendry, Perfect corner reflector, Optics Letters 30, 1204-2016, 2005

[2] P.A. Huidobro, E. Galiffi, S. Guenneau, R.V. Craster et J.B. Pendry, Fresnel drag in space-time modulated metamaterials, Proceedings of the National Academy of Sciences 116, 24943-24948, 2019

[3] Y Liu, S Guenneau, B Gralak, Artificial dispersion via high-order homogenization: magnetoelectric coupling and magnetism from dielectric layers, Proceedings of Royal Society of London A 69, 20130240, 2013

[4] C. Caloz et Z.-L. Deck-Léger, « Spacetime Metamaterials – Part I: General Concepts & Part II: Theory and Applications », IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 68, 2020.

Objectifs :

La notion mathématique de cristaux photoniques spatio-temporels permet d'imaginer de nouvelles propriétés électromagnétiques, notamment pour les antennes : le cristal modulé spatio-temporellement dans [2] pourrait trouver des applications dans des dispositifs d'estimation de la DOA (Direction-Of-Arrival) à une seule antenne. A ce jour, peu ou pas d'implémentations de ces dispositifs émergents sont publiées et les concepts issus de la littérature sont très théoriques, mais le potentiel est là. Si un certain nombre d'applications déjà identifiées présente une forte connotation défense, et donc cela justifie pleinement l'implication de la DGA, l'effervescence de la communauté des microondes pour ce domaine laisse également présager une multitude de nouvelles applications dans les prochaines années. Dans ce contexte, le CNES souhaite explorer les possibilités de l'apport de la modulation temporelle pour la réalisation d'antennes aux performances nouvelles ou permettant de simplifier l'implémentation parfois complexe de certaines solutions existantes.

Démarche :

Les milieux modulés spatio-temporellement nécessitent un traitement théorique et numérique qui leur est dédié, donc la thèse consistera dans un premier temps à faire un état de l'art sur ces métamatériaux d'un nouveau genre puis ensuite à développer des outils théoriques (homogénéisation) et numériques (méthode des matrices de transfert [3]) adaptés à leur étude. A titre d'exemple, la méthode des matrices de transfert est particulièrement bien adaptée pour étudier des structures du type de celle proposée dans [2]. La référence [2] peut notamment servir de point de départ pour le design de coin parfait spatio-temporels, qui seraient une généralisation de [1] à des milieux non réciproques, ainsi que des capes d'invisibilité spatio-temporelles. L'utilisation d'un logiciel d'éléments finis pourra aussi être envisagée pour des modulations plus complexes que celles de [1,2] en années 2 et 3 de la thèse. Un soin tout particulier sera apporté aux applications antennes et radar potentielles.