

---

## Sujet de thèse

Laboratoire: Institut Fresnel

Directeur de thèse: Boris Gralak, [boris.gralak@fresnel.fr](mailto:boris.gralak@fresnel.fr)

Tel: 04 91 28 89 56

Co-encadrant: Maxence Cassier, [maxence.cassier@fresnel.fr](mailto:maxence.cassier@fresnel.fr)

**Sujet: Modélisation modale des résonateurs électromagnétiques dispersifs**

Description du sujet:

Les résonateurs électromagnétiques sont les éléments de base des nouveaux matériaux composites comme les cristaux photoniques, les métamatériaux et les métasurfaces. Ces éléments résonants permettent d'obtenir des propriétés optiques exotiques comme des indices effectifs inférieur à celui dans le vide ou même négatifs, des exaltations de champs importantes ou des gradients d'indice effectif. Ces propriétés offrent de nouvelles opportunités d'application dans les capteurs optiques, l'invisibilité, les optiques plates et ultra-fines, les dispositifs d'affichage innovants [1-2] etc.

Le programme de recherche de thèse propose d'établir une modélisation modale rigoureuse des résonateurs électromagnétiques dispersifs dans l'espace libre ouvert. Cette modélisation s'appuiera sur le formalisme des champs auxiliaires qui permet d'exprimer les équations de Maxwell dissipatives sous la forme d'une équation d'évolution unitaire avec un opérateur auto-adjoint [3-4-5-6]. Cette formulation augmentée des équations de Maxwell sera utilisée pour réaliser une première analyse spectrale rigoureuse des résonateurs électromagnétiques sur l'axe des fréquences réelles. Dans un deuxième temps, les techniques de l'analyse complexe seront exploitées pour passer d'une modélisation sur l'axe réel des fréquences à une modélisation dans le demi plan inférieur des résonances complexes, dans le but d'établir une modélisation rigoureuse des résonateurs en terme de modes associées aux résonances complexes du système. L'objectif est d'établir une théorie rigoureuse de la méthode de décomposition modale des résonateurs électromagnétiques.

Le programme de recherche commencera par l'étude du cas simple d'un résonateur sphérique situé dans l'espace libre et rempli d'un matériau homogène et dispersif. Cette étude sera effectuée par analogie avec le cas de la couche homogène dispersive [7]. La géométrie séparable de ce résonateur aura l'avantage de permettre des calculs analytiques par développement des champs sur les harmoniques sphériques (théorie de Mie). La suite du programme de recherche pourra aborder des exemples théoriques plus généraux, la

modélisation numérique des résonateurs [8-9-10] (en collaboration avec l'équipe ATHENA de l'Institut Fresnel qui développe la méthode des éléments finis) ou l'ingénierie de métamatériaux et de métasurfaces [11].

Des connaissances de la candidate ou du candidat en électromagnétisme, en analyse de Fourier, en théorie spectrale et en analyse complexe sont souhaitées.

### Références bibliographiques :

- [1] H. Bertin, Y. Brûlé, G. Magno, T. Lopez, P. Gogol, L. Pradere, B. Gralak, D. Barat, G. Demésy, and B. Dagens, *Correlated Disordered Plasmonic Nanostructures Arrays for Augmented Reality*, ACS Photonics **5**, 002661 (2018).
- [2] La lettre innovation du CNRS, numéro 45, septembre 2018.
- [3] B. Gralak and A. Tip, *Macroscopic Maxwell's equations and negative index materials*, J. Math. Phys. **51**, 052902 (2010).
- [4] M. Cassier, C. Hazard and P. Joly, Spectral theory for Maxwell's equations at the interface of a metamaterial. Part I: Generalized Fourier transform, Commun. Part. Diff. Eq. **42** (11), pp. 1707-1748 (2017).
- [5] M. Cassier, C. Hazard and M. Kachanovska. Mathematical models for dispersive electromagnetic waves: an overview, COMPUT MATH APPL **74** (11), pp. 2639-2928 (2017).
- [6] M. Cassier, C. Hazard, P. Joly, Spectral theory for Maxwell's equations at the interface of a metamaterial. Part II: Limiting absorption, limiting amplitude principles and interface resonance, Commun. Part. Diff. Eq. **47** (6), 1217-1295, 2022.
- [7] M. I. Abdelrahman and B. Gralak, *Completeness and divergence-free behavior of the quasi-normal modes using causality principle*, OSA Continuum **1**, 000340 (2018).
- [8] P. Lalanne, W. Yan, A. Gras, C. Sauvan, J. -P. Hugonin, M. Besbes, G. Demesy, M. D. Truong, B. Gralak, F. Zolla, A. Nicolet, F. Binkowski, L. Zschiedrich, S. Burger, J. Zimmerling, R. Remis, P. Urbach, H. T. Liu, T. Weiss, *Quasinormal mode solvers for resonators with dispersive materials*, J. Opt Soc. Am A **36**, 000686 (2019).
- [9] Y. Brûlé, B. Gralak, and G. Demésy, *Calculation and analysis of the complex band structure of dispersive and dissipative two-dimensional photonic crystals*, J. Opt. Soc. Am. B. **33**, 691 (2016).
- [10] G. Demésy, T. Wu, Y. Brûlé, F. Zolla, A. Nicolet, P. Lalanne, B. Gralak, *Dispersive perfectly matched layers and high-order absorbing boundary conditions for electromagnetic quasinormal modes*, J. Opt. Soc. Am. A. **40**, 1947 (2023).
- [11] Y. Brûlé, G. Demésy, A.-L. Fehrembach, B. Gralak, E. Popov, G. Tayeb, M. Grangier, D. Barat, H. Bertin, P. Gogol, and B. Dagens, *Design of metallic nanoparticle gratings for filtering properties in the visible spectrum*, Appl. Opt. **54**, 010359 (2015).