

# Thesis subject

**Title : Advanced numerical modeling of nonlinear photonic components**

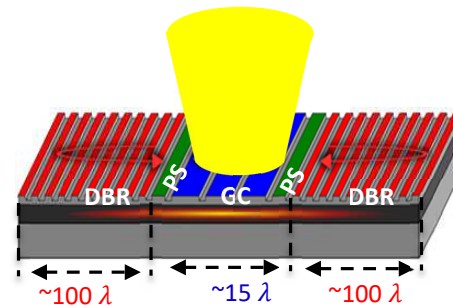
*Laboratory* : Institut Fresnel

*Supervisors* : Hervé Tortel (Professor), Anne-Laure Fehrembach (Assistant professor), Evgueni Popov (Professor)

*Expected funding*: DGA / AMU - **European citizenship required**

*Contacts* : [anne-laure.fehrembach@fresnel.fr](mailto:anne-laure.fehrembach@fresnel.fr) ; [herve.tortel@fresnel.fr](mailto:herve.tortel@fresnel.fr)

The proposed thesis aims at the development of a powerful numerical code, based on the finite element method, to model nonlinear optical phenomena in highly resonant and multi-scale 3D photonic components. The emphasis will be put on the generation of second harmonic, sum and difference frequency, in promising components to realize high-performance optical sources. Among these components, we are particularly interested in CRIGF, for Cavity Resonator Integrated Grating Filters [1,2]. They are formed by a sub-wavelength coupler grating of a few tens of periods placed between two Bragg gratings of several hundreds of periods, etched on a stack of thin layers of dielectric materials used as a waveguide. CRIGF have the ability to generate a strong electromagnetic field concentrated on about ten wavelengths. We are currently exploiting this property in a project funded by ANR and DGA (project RESON 2020-2023) to enhance second order nonlinear optical effects, in particular second harmonic generation [3]. The main targeted application is the creation of high-performance and compact optical sources in wavelength ranges where technological solutions are rare.



However, due to their multi-scale aspect and their highly resonant character, CRIGF are difficult to model numerically, even for the 2D case (invariance of the component in one direction). The 3D case is a real challenge. We currently have 3 numerical methods developed at the Institut Fresnel (Finite Element Method - FEM, Discrete Dipole Approach - DDA, Modal Fourier Method - FMM) to model 2D CRIGFs. To treat the 3D case, we wish to develop a 3D FEM code, in particular by using high order basic functions (necessary because of the high resonant character) and domain decomposition techniques (to treat the multi-scale aspect).

The thesis will be articulated around three parts, intertwined in time.

The first part, essentially at the beginning of the thesis, will be devoted to the training of the PhD student, according to two aspects: numerical modeling, finite element method on the one hand, and non-linear optics, resonant photonic structures on the other hand.

The second part will be devoted to the development of a 3D finite element software. On the basis of an already existing source code developed in our laboratory, the PhD student will focus his work on the implementation of new functionalities such as:

- The use of basic high-order functions dedicated to the diffusion of 3D objects.
- The use of high order basic functions dedicated to the diffusion of 3D objects. The extension to the 3D case of domain decomposition techniques (FETI method [5]), and its application to anisotropic materials.
- All digital developments will be considered in a parallel environment.

For this work, the PhD student will benefit from the Institut Fresnel's expertise in numerical modeling, whether on the finite element method [5], CRIGF modeling [4] or non-linear optical effects [3,6]. Moreover, in the framework of the RESON project, our objective is to develop in parallel another software based on the DDA method for the modeling of second harmonic generation in 3D CRIGF. Although less versatile, this DDA code will allow us to validate the FEM code by comparison.

Finally, in the third part, the study of second harmonic generation in 3D CRIGF will be possible. It will allow to identify the most promising 3D CRIGF configurations, by quantitatively estimating their second harmonic generation efficiency. At the end, we will be able to conclude on the contributions of 3D structuring compared to 2D structuring, in terms of non-linear efficiency, compactness of the structure, independence to the polarization of the component... For these studies, we will pay particular attention to the compatibility of configurations with manufacturing constraints and uncertainties. For this, the work of the PhD student will benefit from the framework of the RESON project, in particular from the collaboration with the experimenters of LAAS-CNRS (Toulouse) involved in the project. Thus, components can be manufactured and characterized at LAAS-CNRS, providing an additional means of validation of the numerical code.

## References

- [1] *Mid-infrared cavity resonator integrated grating filters*, S. Augé, S. Gluchko, A. -L. Fehrembach, E. Popov, A. Thomas, S. Pelloquin, A. Arnoult, A. Monmayrant, O. Gauthier-Lafaye, *Opt.Expr.* **26** (21), 27014-27020 (2018)
- [2] *Extended cavity quantum cascade laser with cavity resonator integrated grating filter*, S. Augé, S. Gluchko, A.-L. Fehrembach, E. Popov, T. Antoni, S. Pelloquin, A. Arnoult, G. Maison, A. Monmayrant, O. Gauthier-Lafaye, *Opt. Expr.* **28** (4), 4801 (2020)
- [3] *Second-harmonic-generation enhancement in cavity resonator integrated grating filters*, F. Renaud, A. Monmayrant, S. Calvez, O. Gauthier-Lafaye, A.-L. Fehrembach, E. Popov, *Opt. Lett.* **44** (21), 5198-5201 (2019)
- [4] *Electromagnetic modelling of large subwavelength-patterned highly resonant structures*, Chaumet, Patrick and Demesy, Guillaume and Gauthier-Lafaye, Olivier and Sentenac, Anne and Popov, Evgeny and Fehrembach, Anne-Laure, *Opt. Lett.* **41**, 2358-2361 (2016).
- [5] *3-D Electromagnetic Scattering Computation in Free-Space With the FETI-FDP2 Method*, Ivan Voznyuk, Hervé Tortel, and Amelie Litman., *IEEE Trans. Ant. Prop.*, **63**(6), 2015. 10, 29
- [6] *Electromagnetic resonances in nonlinear optics*, M. Nevière, E. Popov, R. Reinisch, G. Vitrant, CRC Press 2000

# Sujet de thèse

**Titre : Modélisation numérique avancée de composants photoniques non linéaires**

*Laboratoire :* Institut Fresnel

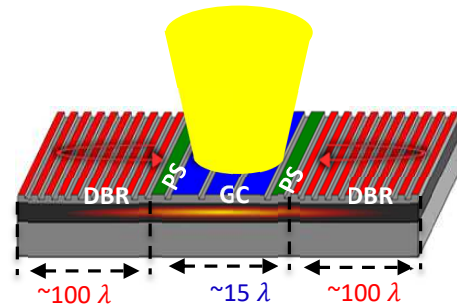
*Encadrants :* Hervé Tortel (Professeur), Anne-Laure Fehrembach (Maitre de conférence), Evgueni Popov (Professeur)

*Financement envisagé :* DGA / AMU - **Nationalité européenne exigée**

*Contacts :* [anne-laure.fehrembach@fresnel.fr](mailto:anne-laure.fehrembach@fresnel.fr) ; [herve.tortel@fresnel.fr](mailto:herve.tortel@fresnel.fr)

La thèse proposée vise au développement d'un code numérique performant, basé sur la méthode des éléments finis, pour modéliser des phénomènes d'optique non linéaire dans des composants photoniques 3D fortement résonnants et multi-échelles. L'accent sera mis sur la génération de seconde harmonique, de fréquence somme et différence, dans des composants prometteurs pour réaliser des sources optiques performantes.

Parmi ces composants, les CRIGF, pour Cavity Resonator Integrated Grating Filters nous intéressent en particulier [1,2]. Ils sont formés par un réseau coupleur sub-longueur d'onde (GC, voir figure) de quelques dizaines de périodes placé entre deux réseaux de Bragg (DBR) de plusieurs centaines de périodes, gravés sur un empilement de couches minces de matériaux diélectriques servant de guide d'onde. Les CRIGF ont la capacité de générer un champ électromagnétique fort et concentré sur une dizaine de longueurs d'onde. Nous exploitons actuellement cette propriété dans un projet financé par l'ANR et la DGA (projet RESON 2020-2023) pour exalter des effets d'optique non linéaire d'ordre 2, en particulier la génération de seconde harmonique [3]. L'application principale visée à moyen terme est la création de sources optiques performantes et compactes dans des domaines de longueur d'onde où les solutions technologiques sont rares.



Cependant, de par leur aspect multi-échelle et leur caractère fortement résonnant, les CRIGF sont difficiles à modéliser numériquement, même pour le cas 2D (invariance du composant dans une direction). Le cas 3D est un véritable challenge. Nous disposons actuellement de 3 méthodes numériques développées à l'Institut Fresnel (Méthode des éléments finis - FEM, Méthode des dipôles couplés – DDA, Méthode Modale de Fourier - FMM) pour modéliser des CRIGF 2D. Pour traiter le cas 3D, nous souhaitons développer un code FEM 3D, en particulier en recourant à des fonctions de base d'ordre élevé (nécessaire à cause du caractère fortement résonnant) et à des techniques de décomposition de domaine (pour traiter l'aspect multi-échelle).

Le déroulement de la thèse s'articulera autour de trois parties, entrelacées dans le temps.

La première partie, essentiellement en début de thèse, sera consacrée à la formation du doctorant, selon deux aspects : modélisation numérique, méthode des éléments finis d'une part, et optique non linéaire, structures photoniques résonnantes d'autre part.

La seconde partie sera consacrée au développement d'un logiciel 3D en éléments finis. Sur la base d'un code source déjà existant développé dans notre laboratoire, le doctorant concentrera ses travaux sur la mise en œuvre de nouvelles fonctionnalités telles que :

- L'utilisation de fonctions de base d'ordre élevé dédiées à la diffusion d'objets 3D.
- L'extension au cas 3D des techniques de décomposition de domaines (méthode FETI [5]), et son application aux matériaux anisotropes.
- Tous les développements numériques seront considérés dans un environnement parallèle.

Pour ce travail, le doctorant bénéficiera de l'expertise de l'Institut Fresnel en matière de modélisation numérique, que ce soit sur l'aspect méthode des éléments finis [5], modélisation des CRIGF [4] ou des effets d'optique non linéaire [3,6]. De plus, dans le cadre du projet RESON, notre objectif est de développer en parallèle un autre logiciel basé sur la méthode DDA pour la modélisation de la génération de seconde harmonique dans les CRIGF 3D. Bien que moins versatile, ce code DDA pourra permettre de valider le code FEM par comparaison.

Enfin, dans la troisième partie, l'étude de la génération de seconde harmonique dans les CRIGF 3D sera possible. Elle permettra d'identifier les configurations CRIGF 3D les plus prometteuses, en estimant quantitativement leur efficacité de génération de seconde harmonique. Au final, nous pourrions conclure sur les apports de la structuration 3D par rapport à une structuration 2D, en terme d'efficacité non linéaire, de compacité de la structure, d'indépendance à la polarisation du composant...

Pour ces études, nous porterons une attention particulière à la compatibilité des configurations avec les contraintes et incertitudes de fabrication. Pour cela, le travail du doctorant bénéficiera du cadre du projet RESON, en particulier de la collaboration avec les expérimentateurs du LAAS-CNRS (Toulouse) impliqués dans le projet. Ainsi, des composants pourront être fabriqués et caractérisés au LAAS-CNRS, apportant un moyen de validation supplémentaire du code numérique.

## Références

- [1] *Mid-infrared cavity resonator integrated grating filters*, S. Augé, S. Gluchko, A. -L. Fehrembach, E. Popov, A. Thomas, S. Pelloquin, A. Arnoult, A. Monmayrant, O. Gauthier-Lafaye, Opt.Expr. **26** (21), 27014-27020 (2018)
- [2] *Extended cavity quantum cascade laser with cavity resonator integrated grating filter*, S. Augé, S. Gluchko, A.-L. Fehrembach, E. Popov, T. Antoni, S. Pelloquin, A. Arnoult, G. Maison, A. Monmayrant, O. Gauthier-Lafaye, Opt. Expr. **28** (4), 4801 (2020)
- [3] *Second-harmonic-generation enhancement in cavity resonator integrated grating filters*, F. Renaud, A. Monmayrant, S. Calvez, O. Gauthier-Lafaye, A.-L. Fehrembach, E. Popov, Opt. Lett. **44** (21), 5198-5201 (2019)
- [4] *Electromagnetic modelling of large subwavelength-patterned highly resonant structures*, Chaumet, Patrick and Demesy, Guillaume and Gauthier-Lafaye, Olivier and Sentenac, Anne and Popov, Evgeny and Fehrembach, Anne-Laure, Opt. Lett. **41**, 2358-2361 (2016).
- [5] *3-D Electromagnetic Scattering Computation in Free-Space With the FETI-FDP2 Method*, Ivan Voznyuk, Hervé Tortel, and Amelie Litman., IEEE Trans. Ant. Prop., **63**(6), 2015. 10, 29
- [6] *Electromagnetic resonances in nonlinear optics*, M. Nevière, E. Popov, R. Reinisch, G. Vitrant, CRC Press 2000