

11^{ème} CONFÉRENCE PLÉNIÈRE GDR ONDES

29 - 30 octobre 2025

📍 SUPMICROTECH-ENSMM
Université Marie et Louis Pasteur

Besançon

- 🕒 Conférences plénières
- 🕒 Sessions Posters
- 🕒 Exposés Club des Partenaires
- 🕒 Exposés des GT
 - GT1 – Modélisation et simulation
 - GT2 – Physique et ingénierie des structures sous-longueur d'onde
 - GT3 – Capteurs, imagerie et inversion
 - GT4 – Antennes et circuits : des micro-ondes aux ondes millimétriques et THz
 - GT5 – Compatibilité électromagnétique
 - GT6 – Imagerie en milieux complexes : modélisation, instruments, traitements



INSCRIPTIONS

<https://gdr-ondes2025.sciencesconf.org>

Onzième Conférence Plénière du GDR ONDES

SUPMICROTECH-ENSMM - Campus Bouloie, Besançon

26 rue de l'épître

Mercredi 29 et jeudi 30 octobre 2025, Besançon

Mercredi 29 octobre 2025

Hall - 8h30 - 9h30

Accueil Café et retrait des badges

Accrochage Posters dès 8h30

Amphi Emilie du Chatelet – 9h30 – 9h45

Discours d'ouverture

Amphi Emilie du Chatelet – 9h45 – 11h15

Conférences plénières

- Katia Grenier (45')

- Thibaut Devolder (45')

Amphithéâtres – 11h15 – 12h45

Amphi Jules Haag

Exposés GT1

*Modélisation et
simulation*

Amphi P. Mesnage

Exposés GT3

*Capteurs, imagerie
et inversion*

Hall – 12h45 – 14h00

Déjeuner buffet

Hall – 14h00 – 16h30

Affiches GT1, GT3, GT5

Pause-café durant la session

Amphithéâtres – 16h30 – 18h00

Amphi Jules Haag

Exposés GT2

*Physique et
ingénierie des
structures sub- λ*

Amphi P. Mesnage

Exposés GT5

*Compatibilité
électromagnétique*

Espace Grammont – 19h30 – 21h30

Cocktail

20, rue Mégevand, 25000 Besançon

Jeudi 30 octobre 2025

Hall - 8h30 - 9h00 Grand Hall

Accueil Café

Accrochage Posters dès 8h30

Amphithéâtres – 9h00 – 10h30

Amphi Jules Haag

Exposés GT4

Antennes et circuits

Amphi P. Mesnage

Exposés GT6

*Imagerie en milieux
complexes*

Hall – 10h30 – 11h00

Pause-café

Amphi Emilie du Chatelet – 11h00 – 11h45

Bilans

GT, Club des partenaires, Groupes de réflexion

Amphi Emilie du Chatelet – 11h45 – 12h45

Exposés sollicités du Club des Partenaires

Hall – 12h45 – 14h00

Déjeuner buffet

Hall – 14h00 – 16h30

Affiches GT2, GT4, GT6

Pause-café durant la session

+ **Session « codes libres »** - amphi Chatelet

Amphi Emilie du Chatelet – 16h30

Clôture de la conférence plénière

<https://gdr-ondes2025.sciencesconf.org/>

Table des matières

Couverture	1
Programme	2
Conférence plénière	1
Effets combinés des ondes RF et des nanomatériaux : une éventualité environnementale ?, Grenier Katia [et al.]	1
Magnonics – Concepts and Applications, Devolder Thibaut	3
Oral GT1 – Modélisation et simulation	4
Wave propagation across interfaces with time-varying jump conditions, Touboul Marie [et al.]	4
Homogenization of electromagnetic metasurfaces: plasmonic and Mie resonances, Lebbe Nicolas [et al.]	7
Advanced numerical design methodologies for next-generation metasurface architectures, Elsayy Mahmoud [et al.]	9
Oral GT2 – Physique et ingénierie des structures sous-longueur d’onde	11
Materials with elastic membranes : negative acoustic density, Pierre Juliette . . .	11
Terahertz metamaterials with ultra-subwavelength confinement for quantum devices, Todorov Yanko	13
Propriétés optiques de structures auto-organisées induites par laser dans les films plasmoniques nanocomposites, Le Van Doan [et al.]	14

Oral GT3 – Capteurs, imagerie et inversion	16
Magnetic field detection with spintronics: state of the art and innovations, Pannetier-Lecoeur Myriam	16
Apprentissage automatique de modèles complexes pour la projection d’images 3D à travers des fibres optiques multimodales, Kermène Vincent [et al.]	18
Reflection Matrix Imaging: From quantitative ultrasound to deep optical microscopy and passive seismology, Aubry Alexandre	21
Oral GT4 – Antennes et circuits : des micro-ondes aux ondes millimétriques et THz	22
Metamaterial-Based Waveguides and Leaky-Wave Antennas from modeling challenges to sensing applications, Valerio Guido	22
Résonateur coaxial à saut d’impédance pour filtres Tx en environnement spatial, Rius Eric	24
Électronique à l’état solide de type III-As et III-N pour applications hyperfréquences, Zakkoune Mohammed	25
Oral GT5 – Compatibilité électromagnétique	26
La recherche en CEM pour l’aéronautique - 40 ans de moments clefs et défis vus au travers de l’ONERA, Jean-Philippe Parmantier	27
Caractérisation et modélisation CEM en électronique de puissance, Serpaud Sébastien	27
Attaques par perturbations sur les composants embarqués : techniques existantes et défis actuels, Hiscock Thomas.	30
Oral GT6 – Imagerie en milieux complexes : modélisation, instruments, traitements	32
Apport des théories de multi-diffusion à l’interprétation des données de sismologie planétaire : l’exemple de la mission InSight sur Mars, Margerin Ludovic	32
Freeform Hadamard spectral imaging, Ducros Nicolas	35
Thermalization of photons in disordered scattering media, Krachmalnicoff Valentina	36

Club des partenaires**37**

Stratégies de détection et de localisation d'ondes impulsionnelles EM à coût maîtrisé, Schutz Maxime	37
Capteur de champ électrique basé sur des cristaux photoniques sur couches minces de niobate de lithium, Fayssaud Jean-David [et al.]	42
Caractérisation d'un démonstrateur AESA DBF bande L sur signal modulé, Melle Christophe	44

Session 'Codes libres'**46**

PyMoosh : librairie Python Open-Source pour la simulation optique de systèmes multicouches, Langevin Denis [et al.]	46
Résolution de problèmes d'ondes avec FreeFem++ (éléments finis), Laude Vincent	49
Software tool for modelling photonic nanostructures: SimPhotonicsFMM Matlab Toolbox, Besbes Mondher	50
Practical metasurfaces applications in automotive domain, Alvear Eduardo	52
Enabling Meta-surface Design with OptSimBox: Integrating Neural Network Technologies, Rideau Denis	53
Développer des technologies numériques pour la formation, fondées sur L'analyse de leur efficacité, l'usage et les performances d'apprentissage, Larrue Florian	55

Affiche GT1**57**

Entrainement d'une onde par un plasma : couplage entre moment angulaire de l'onde et rotation, Gueroult Renaud [et al.]	57
Interaction spin-orbite dans les milieux en mouvement, Braud Aymeric	60
Impact of disorder on the radiative efficiency of bound states in the continuum in dimer gratings, Kalt Victor [et al.]	63
De la théorie de Lorenz-Mie à la diffraction de Fresnel, Chabrol Lilian [et al.]	65
Améliorer la sensibilité de la SPR grâce aux résonateurs à gap-plasmon, Bennet Pauline [et al.]	67

Métasurfaces à modulation temporelle pour des applications antennaires, Coumbassa Mabinty	69
Dipole Radiation in Dispersive and Lossy Photonic Time Crystals, Allard Thomas	71
Computation of optical properties of soot nanoparticles: transitioning between an atomistic model and a surface integral equations methods, Brosseau-Habert Nicolas [et al.]	72
Fils textiles photoniques pour le contrôle des ondes électromagnétiques dans l'infrarouge, Demulier Charlotte [et al.]	74
Affiche GT2	75
Controlling heat capacity in a thermal concentrator using metamaterials: numerical and experimental studies, Arepolage Thiwanka [et al.]	75
Matériaux à changement de phase pour la photonique sur silicium programmable, Pourny Charles [et al.]	78
Résonances dans les cristaux photoniques 1D bicouches twistés, Lavignac Marion [et al.]	81
Radio wave attenuation by a large-scale photonic crystal sculpture, Röhligh David	83
Couleurs structurelles de métasurfaces plasmoniques désordonnées : théorie et simulation, Hu Jialin [et al.]	85
Self-Organized Freeform Waveguiding, Chehami Fadhila [et al.]	87
Complex dispersion of Rayleigh-Bloch waves, Laude Vincent	89
Métasurface programmable combinée à de l'apprentissage profond pour l'estimation de la direction d'arrivée, Meftah Nawel [et al.]	90
Characterization of nanostructured materials by Brillouin Light Scattering, Ugarak Fehima [et al.]	92
Filtres CRIGF en AlGaAs/GaAs : vers une accordabilité active ?, Blandin Tanneguy [et al.]	94
La phase en nanophotonique pour les applications capteurs : cas des métasurfaces avec une singularité de phase, Berguiga Lotfi	96

LNOI Cavity-Resonant Integrated Grating Filters for Tunable, Fine-Resolution Spectroscopy, Monmayrant Antoine [et al.]	98
Démonstration de LED à boîtes quantiques émettant des vortex de lumière polychromatique et directionnelle, Degiron Aloyse [et al.]	100
Nanofibre silice pour l'optique non-linéaire, Colombel Simon [et al.]	102
Approached model of outcoupling arrays for LiDARs applications, Antigny Hugo [et al.]	104
Vers des cavités à miroirs de Bragg dans des guides d'ondes en niobate de lithium sur film mince, Dutron Théo [et al.]	106
Génération de seconde harmonique par quasi accord de phase dans des nanoguides de niobate de lithium, Benon Nathanaëll [et al.]	108
Instabilité de polarisation dans des fibres à maintien de polarisation à dispersion normale et son impacte sur la génération de supercontinuum, Morel Romain . . .	110
Photonic Step Ladder Sensors, Akjouj Abdellatif [et al.]	112
Modes de Tamm d'ordre supérieur induits par une couche métallique perforée pour la détection optique, Haidar Oumaima [et al.]	113
Affiche GT3	115
Mapping the magnetic response of materials on a local scale using magneto-resistive sensors, Solignac Aurélie [et al.]	115
Estimation haute-résolution des angles d'arrivées pour les antennes à ondes de fuite à balayage électronique, Gazzah Houcem	118
Estimating the radius from a monodisperse collection of randomly oriented non-spherical particles, Malaval François	119
MIMOSA : un nouveau dispositif de mesure de diffraction à Marseille, Geffrin Jean-Michel	121
Improved Post-Treatments of Measurements with Missing Angular Data in Scattering, Samara Elio [et al.]	123
Groupe de Réflexion PIPIAC - Propagation d'Incertitudes dans les Problèmes Inverses Appliqués à la Caractérisation, Richalot Elodie	125

End-to-end design of optics and neural network for a privacy preserving camera, Trouvé-Peloux Pauline	127
Réseau français de magnétométrie, Solignac Aurélie [et al.]	129
Imagerie de contraste speckle laser (LSCI) en temps réel pour l'assistance à la chirurgie thyroïdienne, Dareau Arthur	131
Simulation of Fluorescence Diffuse Optical Tomography Images for Database Creation, Rodriguez-Vega Martin [et al.]	133
Towards Dynamic 3D Elastography of Oocytes, Pacheco João Luiz	135
Affiche GT4	136
Conception et mesure de coupleurs hybrides à base de twists en technologie GaN pour des applications 5G, Vigneswaran Sujeevan [et al.]	136
Morphogenetic Metasurface Antennas, Uche Chidinma Nnekwu	139
Antennes boucles magnétiques à 1 GHz pour lentilles de contact intelligentes, Salzenstein Patrice [et al.]	141
Réglage automatique électrique d'un filtre planaire à l'aide de matrices de couplages, Watt Dieynaba Mamadou [et al.]	143
Huygens' Metasurface for Sub-7 GHz MIMO Antenna Beamsteering, Medrar Ghiles [et al.]	145
Filtres SAW sur substrats composites POI : nouveaux concepts et structures disruptives, Ballandras Sylvain [et al.]	147
Métasurfaces codées et absorbantes pour la réduction de la Surface Équivalente Radar (RCS), Yohan Bouyer [et al.]	149
Affiche GT5	151
Extension du modèle ICIM-CI aux signaux modulés en amplitude, Duguet Antoine [et al.]	151
METHODES DE MAILLAGE CONFORME EN FDTD-PIC POUR LA RESOLUTION DES EQUATIONS DE MAXWELL ET DE VLASOV AFIN DE SIMULER L'EVOLUTION D'UN CHAMP ELECTROMAGNETIQUE ET D'UN PLASMA FORTEMENT COUPLES, Garbaye Louis	154

Analyse des impulsions CW en chambre réverbérante incluant la VIRC pour des tests de susceptibilité rayonnée, Guyomard Teddy, André, Guy	156
Augmentation de la dynamique de mesures non invasives d'efficacité de blindage à l'aide d'une VIRC, Jacquet Quentin	158
Amélioration des performances d'absorbants micro-ondes à base de composites silicone structurés grâce à la gravure laser., Danielou Gwenvael [et al.]	160
Analyse comparative entre mesures expérimentales et simulations pour l'évaluation d'un modèle numérique de fente appliqué à différentes topologies, Guiffaut Christophe [et al.]	162
MODELISATION HF D'UNE CHAÎNE D'ENTRAÎNEMENT, Frouin Louis . . .	165
Modélisation et évaluation de la distribution des courants " foudre " sur un système aéronautique, Cvetkovic Danica [et al.]	169
Etude de la susceptibilité EM d'une chaîne microcontrôleur- servomoteur, Boni Salifou Radjaou	171
Caractérisations et simulations électrothermiques des émissions de mode commun et de champ rayonné des circuits d'électronique de puissance sur PCB., Dienot Jean-Marc [et al.]	173
Modélisation des interactions électromagnétiques sur les architectures électriques de puissance, Artaud Noan [et al.]	176
Affiche GT6	178
Onzième Conférence Plénière du GDR ONDES SUPMICROTECH-ENSMM, Besançon 29 et 30 octobre 2025 Modélisation du transport de la lumière dans des milieux très hétérogènes : application aux vitraux contemporains de Pierre Soulage, Milcent Simon	178
Optimized Reconstruction Framework in Fluorescence Diffuse Optical Tomography Using Radiative Transfer Equation, Nguyen Pascal [et al.]	181
Modélisation semi-analytique avancée de l'inspection ultrasonore de structures en béton, Khalid Nouhayla [et al.]	183
Impact de la structuration des ondes ultrasonores sur la reconstruction Tomographique Acousto-Optique, Duclos Lucas [et al.]	184
Liste des participants	186

Conférence plénière

Effets combinés des ondes RF et des nanomatériaux : une éventualité environnementale ?K. Grenier¹, D. Dubuc¹, B. Cerdan¹, E. Flahaut², C. Gironde³, C. Furger³¹ : Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes, LAAS-CNRS, CNRS, Université de
Toulouse, Toulouse² : CIRIMAT, CNRS, Toulouse³ : Anti Oxidant Power, Toulouse
grenier@laas.fr**Résumé**

Les champs électromagnétiques sont largement employés pour des applications civiles et militaires. D'un point de vue économique et sociétal, ces champs radiofréquences (RF) prennent une place croissante dans notre vie et notre environnement quotidien depuis plusieurs décennies, que ce soit pour du chauffage rapide, les télécommunications sans fil, la géolocalisation (GPS), ainsi que pour des radars divers (anti-collision, domotique, signaux vitaux...), ou encore le transfert d'énergie à distance notamment. Même si la réglementation actuelle implique des conditions d'exposition aux ondes RF, il est primordial de connaître et d'être sûr des possibles effets de ces ondes sur la santé humaine ainsi qu'à l'échelle cellulaire, qu'ils soient bénéfiques ou néfastes, et ce en fonction des conditions d'exposition et dans un environnement réaliste. Jusqu'ici la très grande majorité des études sont menées en ne considérant que les ondes RF seules. Or l'environnement humain est complexe et peut impliquer des agents polluants chimiques, physiques, comme les pesticides, les nanomatériaux ou encore les rayonnements lumineux ou ionisants utilisés pour des analyses médicales et lors de thérapies. A ce jour, peu de littérature sur d'éventuels effets combinés des ondes RF avec d'autres facteurs de stress environnementaux existe et se limite majoritairement à des co-expositions aux ondes RF avec des produits chimiques de type médicamenteux. Pourtant la forte interaction des ondes électromagnétiques avec les nanomatériaux est connue et utilisée pour des applications cliniques, notamment en oncologie (thérapie hyperthermique du cancer). Cette présentation aborde grâce au développement de systèmes d'exposition in vitro et en champ proche l'évaluation de l'association d'ondes RF avec d'autres agents polluants dont des nanomatériaux.

Remerciements

Les auteurs remercient le support de l'ANSES par le financement du projet « NANOWAVE » ANSES EST-19 RF-25.

Magnonics: concepts and applications

Thibaut Devolder, Jean-Paul Adam, Titiksha Srivastava, Alexandre Hamadeh, Claude Chappert and
Joo-Von Kim.

Centre de nanosciences et de nanotechnologies

thibaut.devolder@cnrs.fr

Spin waves (SW) are the collective oscillations in magnetic materials with their associated quantum of excitation called magnons (as phonons are to lattice vibrations). Magnons exhibit a rich dynamics including non-reciprocity, non-linear frequency shifts and magnon-magnon interactions, including various forms of “collisions” including scattering, splitting and confluence. Besides their fundamental interest when dealing with problems involving magnetization dynamics, the magnons are used for microwave signal processing (present) and are promising for unconventional computing applications.

In this tutorial, I will introduce the semiclassical theory of spin waves, based on the linearized Landau-Lifshitz equation in order to give their dispersion relation and to understand of the phenomena underlying non-reciprocity. I will also review some of the non-linear process like three-magnon scattering and detail how they offer new avenues for information processing like frequency-selective power limitation or pattern recognition.

Oral GT1 – Modélisation et simulation

Wave propagation across interfaces with time-varying jump conditions

M. Darche¹, M. Touboul², B. Lombard¹, R. Assier³, S. Guenneau⁴

¹ : Aix-Marseille Univ, CNRS, Centrale Marseille, LMA, Marseille, France

² : POEMS, ENSTA, CNRS, INRIA, Institut Polytechnique de Paris, Palaiseau, France
marie.touboul@ensta.fr

³ : Department of Mathematics, University of Manchester, UK

⁴ : UMI 2004 Abraham de Moivre-CNRS & Department of Physics, Imperial College London, UK

Summary

We consider wave propagation in a 1D medium containing N interfaces whose jump conditions are modulated in time. In the case of a single interface ($N=1$), properties of the scattered waves are investigated theoretically and numerically: energy balance, generation of harmonics, impedance matching and non-reciprocity. In the case of a periodic network, low-frequency homogenization is performed for different regimes of the frequency of modulation. When the frequency of modulation is low or moderate, standard homogenization is applied and ends up with a reciprocal effective model with time-dependent effective coefficients. For time-periodic modulations, the occurrence of gaps in wavenumber is illustrated. In the regime of high-frequency modulation, homogenization with a fast-time scale leads to an effective model with constant effective parameters but with a Willis coupling term breaking reciprocity. Comparisons with time-domain simulations illustrate the findings.

1. Introduction

Time modulation of the physical parameters offers new possibilities for wave control. Examples include amplification of waves, harmonic generation and non-reciprocity, without resorting to non-linear mechanisms. Most of the recent studies on the matter focus on the time-modulation of the physical properties of a given media, that is, a time-modulation ‘in volume’. Here, we focus instead on time modulation at some lower-dimensional space by considering time-varying jump conditions across some interface. The latter offers simpler solutions for practical implementation.

2. One modulated interface

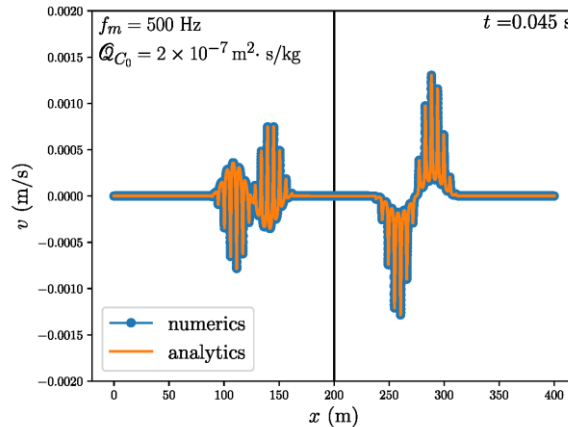


Figure 1. Scattering by an interface with modulated stiffness.

We consider wave propagation in a one-dimensional medium containing one modulated interface [1].

This interface is modelled by a jump condition for the velocity and for the stress, which involves interfaces parameters (inertia, compliance and dissipation of the interface) which depends on time. From a theoretical point of view, an energy balance is conducted, the generation of harmonics is studied through a harmonic balance analysis, and the particular case of reflectionless modulated interface is discussed. A time-domain numerical method is also developed and validated to simulate transient wave phenomena across such a modulated interface. Integration of the momentum equation and of the constitutive law is done by a fourth-order finite-difference ADER scheme. The time-varying jump conditions are discretized by the Explicit Simplified Interface Method (ESIM) [2], requiring new developments of this method. Validation of the numerical results is done by comparisons with a semi-analytical solution, see Figure 1. Numerical experiments are then performed to illustrate the theoretical findings and the non-reciprocal behavior.

3. A periodic network of modulated interfaces

We then consider a periodic network of modulated interfaces, see Figure 2. Each unit cell contains N_i modulated interfaces which properties may differ from one another. This setting is studied through the lens of low-frequency homogenization. The effective model obtained is characterized by effective parameters which are constant in space but depend on time. If the modulations of the interface properties are periodic in time, such are the effective parameters, which therefore leads to the occurrence of gaps in wavenumber. This phenomenon is illustrated numerically together with the validity of the effective leading order model for low values of the source frequency and of the frequency of modulation. A second-order model is then derived to describe the dispersive effects which are missed by the leading-order one. However, even at the second order, the effective models obtained are reciprocal while non-reciprocity is observed numerically for a high-frequency of modulation and a periodic cell containing several interfaces whose modulations are not in phase. To overcome this limitation, we then introduce a fast time scale in the homogenization process. The effective model obtained then presents an effective Willis coupling term.

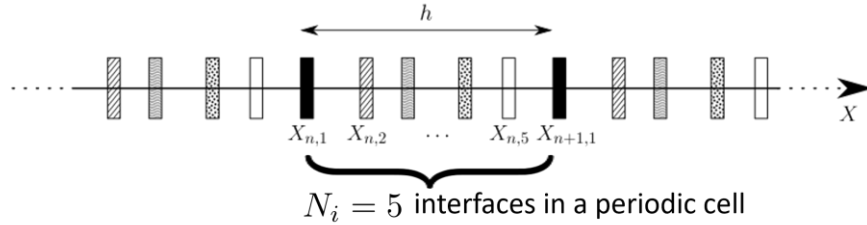


Figure 2. Periodic network of N_i modulated interfaces

4. Acknowledgements

M. D. was funded as a post-doctoral researcher by the Institut Mécanique et Ingénierie (Marseille, France). S. G. was funded by UK Research and Innovation (UKRI) under the UK government's Horizon Europe funding guarantee (grant number 10033143).

5. References

- [1] Darche M., Assier R., Guenneau S., Lombard B., Touboul M., *Scattering of transient waves by an interface with time-modulated jump conditions*, accepted in *Compte Rendus. Mécanique* (2025).
- [2] Lombard B., Piraux J., *How to Incorporate the Spring-Mass Conditions in Finite-Difference Schemes*, *SIAM Journal on Scientific Computing* **24** (2003).

Homogenization of electromagnetic metasurfaces: plasmonics and Mie resonances

N. Lebbe^{1*}, K. Pham², A. Maurel³

¹ : Univ Toulouse, Toulouse INP, CNRS, LAPLACE,

² : IMSIA, CNRS, EDF, CEA, ENSTA Paris, Institut Polytechnique de Paris,

³ : Institut Langevin, ESPCI Paris, Université PSL, Sorbonne Université, Université de Paris, CNRS,

* nicolas.lebbe@laplace.univ-tlse.fr

Abstract

The asymptotic homogenization theory is used to replace deeply-subwavelength metasurfaces made of resonant elements with effective transition conditions involving dispersive surface susceptibilities. We will present how the homogenization process works for both Mie resonances coming from high permittivity dielectrics and localized surface plasmon when metals with negative permittivity are considered. In two dimensions, both resonances can exist in the Transverse Magnetic (TM) polarization. In the Transverse Electric (TE) polarization however, Mie resonances can also be excited. The fundamental differences between the two polarizations for this type of resonator will be presented.

1. Introduction: effective transition conditions for metasurfaces

Over the last few decades, homogenization models have been developed that reduce the geometric complexity of a metasurface into a flat interface on which effective transitions conditions are applied; see Fig. 1. In electromagnetics, these conditions relies on surface susceptibilities χ_{ee} , χ_{mm} and χ_{em} [1].

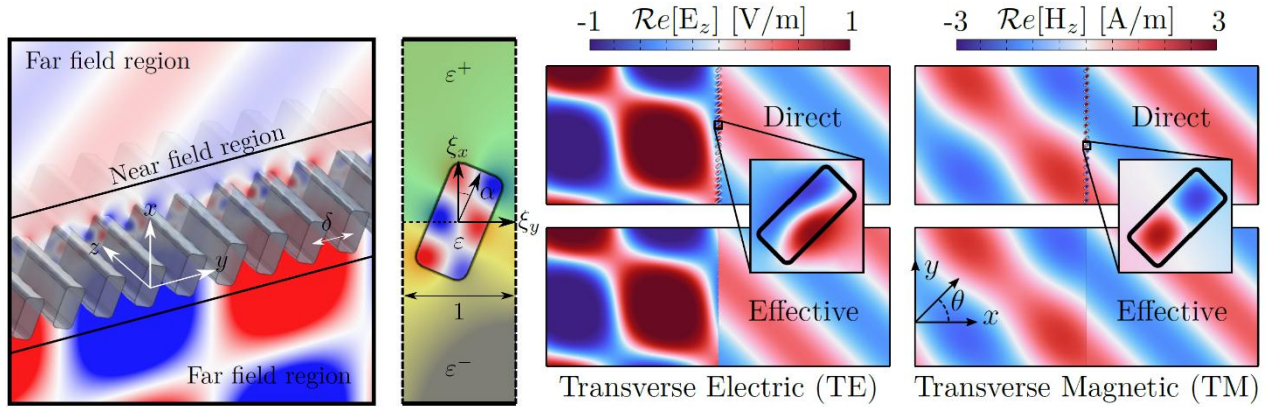


Figure 1. (left) A metasurface made of deeply-subwavelength particles with permittivity ϵ . (right) Comparison between direct FEM simulations and our effective model at $\vartheta = \pi/4$ for Mie resonances when $\epsilon = 1000$.

2. Resonant metasurfaces: results from the asymptotic homogenization

For plasmonic metasurfaces, we have shown in [2] that the dispersion relation of χ_{ii} is obtained through the solution of a single plasmonic eigenvalue problem. More recently in [3], we have derived the relation dispersion for Mie resonances for both TE and TM polarizations. The main difference between these two can be observed in Fig. 2; (1) far from the resonances, the metasurface is perfectly reflective (resp. perfectly transparent) in the TE (resp. TM) polarization and (2) in the TM polarization the resonances are not affected by the surrounding of the particle and thus, the eigenfrequencies do not depend

on their orientation α .

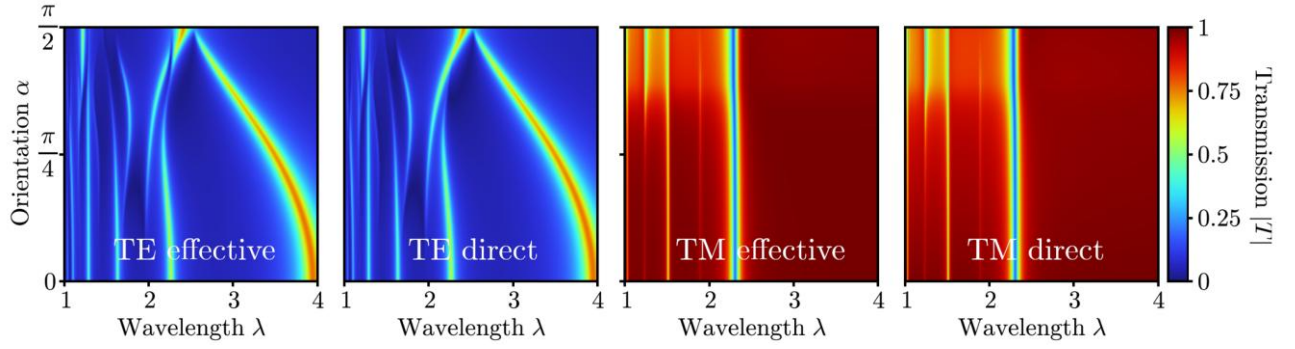


Figure 2. Comparison between direct FEM simulations and our effective model for $|T|$ at different wavelength λ and orientation α of the particles.

3. References

- [1] N. Lebbe et al. Stable GSTC formulation for Maxwell's equations, *IEEE TAP*, 2022.
- [2] N. Lebbe et al. Homogenized transition conditions for plasmonic metasurfaces, *PRB*, 2023.
- [3] N. Lebbe et al. Homogenization of high-permittivity metasurfaces in the TE polarization, *in preparation*.

Advanced numerical design methodologies for next-generation metasurface architectures**M. Elsawy**, A. Clini de Souza, E. Isnard, R. Gelly, and S. LanteriUniversité Côte d'Azur, Inria, CNRS, LJAD, 06902 Sophia Antipolis Cedex, France
*mahmoud.elsawy@inria.fr***Abstract**

Metasurfaces [1-2], with their intricate subwavelength designs, provide precise level of control of the light properties. This peculiar control paves the way towards the realization of innovative applications ranging from broadband achromatic lenses to quantum photonics and modern AR/VR displays. Yet, each application has its own unique and demanding performance criteria, which necessitate precise management of dispersion, the ability to scale to larger sizes, and the integration of innovative, dynamic mechanisms such as time-varying and nonlinear responses. This presentation will tackle these challenges by examining the fundamental issues in modelling these complex behaviours beyond the traditional modelling aspects. Furthermore, classical design methodologies like lookup tables and parametric sweep fail to meet the requirements of such systems, given that the underlying design spaces are high-dimensional and the geometrical features interact with system performance in a complex manner. Thus, there is increasing demand to develop inverse design methods which are capable of directly deducing the optimal structural parameters given target performance requirements. Traditional inverse design methods can be very expensive in terms of computation, and they often struggle with fabrication imperfections. To address this, we exploited an innovative statistical learning-based optimization methods [3-5]. These methods are much more efficient at exploring sophisticated objective functions [6], can manage multiple objectives simultaneously, and more importantly, can take into account the fabrication tolerances [7].

In the second part of our discussion, we tackle a significant challenge: scalability. When it comes to designing large-scale metasurfaces, such as the metalenses used in virtual reality, traditional optimization algorithms can be a real challenge due to their high computational demands. To tackle this issue, we developed recently [8-9] an innovative deep learning-based approach that takes a "divide and conquer" strategy. We start by creating a library of compact, neural network-optimized beam-deflecting elements. Then, we use a sophisticated, physics-aware model that acts like a smart architect, piecing together these pre-optimized components into a complete lens while ensuring everything aligns perfectly in terms of phase and interaction. This comprehensive framework is highly efficient, allowing us to create metalenses with different apertures and focal lengths on demand, all without having to re-optimize from the ground up. This makes it naturally scalable for practical manufacturing.

In the third part, we move from static metasurfaces to reconfigurable ones. Most current devices are passive, meaning their optical response is fixed after fabrication, but future applications in communications and adaptive imaging will require real-time tunability. Modelling these systems is challenging because, unlike passive designs, the optimization depends on changes in the permittivity rather than geometry. This is particularly difficult since physical tuning mechanisms usually allow only small changes, especially for high-speed modulation. For example, electro-optic heterostructures with multi-quantum wells (MQWs) typically allow refractive index changes of only 0.01. We recently developed [10] a universal design methodology for active metasurfaces that achieves full phase modulation with nearly 100% amplitude modulation. However, high-Q resonances lead to strong nonlocal coupling, which can degrade performance. To address this, we designed active

metasurface supercells supporting strongly resonant field distributions and used a stochastic global optimization method (StoSOO) to explore the design space efficiently while accounting for nonlocal interactions. This approach has produced beam-forming designs with outstanding performance, achieving deflection efficiencies above 85% in realistic, fabricable devices.

Finally, I will discuss our recent activities in modelling space-time metasurface, a key step forward for the field of active metasurface. By combining temporal modulation with spatial structuring, these devices enable functions that static metasurfaces cannot achieve, such as nonreciprocal light transport, frequency conversion, and ultrafast optical control. Modelling them is a challenging task. In our case, we rely on a Discontinuous Galerkin Time-Domain (DGTD) framework, which can accurately capture the complex dynamics of time-modulated systems. We will present preliminary results showing how DGTD can be applied to realistic structures, providing a path for both studying and designing space-time metasurfaces for future adaptive and reconfigurable optics.

References

- 1- P. Lalanne, S. Astilean, P. Chavel, E. Cambril, and H. Launois, "Blazed binary subwavelength gratings with efficiencies larger than those of conventional échelle gratings," *Opt. Lett.*, vol. 23, no. 14, pp. 1081–1083, 1998
- 2- Capasso, F., Genevet, P., Kats, M. A., Aieta, F., Tetienne, J.-P., & Gaburro, Z. (2011). Light propagation with phase discontinuities: generalized laws of reflection and refraction. *Science*, 334(6054), 333–337
- 3- M. Elsaywy, S. Lanteri, R. Duvigneau, G. Brière, M. S. Mohamed, and P. Genevet, "Global optimization of metasurface designs using statistical learning methods," *Sci. Rep.*, vol. 9, p. 1–15, 2019.
- 4- M. Elsaywy, S. Lanteri, R. Duvigneau, J. A. Fan, and P. Genevet, "Numerical optimization methods for metasurfaces," *Laser Photonics Rev.*, vol. 14, no. 10, p. 1900445, 2020.
- 5- E. Isnard, S. Héron, S. Lanteri, and M. Elsaywy. Advancing wavefront shaping with resonant nonlocal metasurfaces: beyond the limitations of lookup tables. *Sci Rep* **14**, 1555 (2024)
- 6- M. Elsaywy, A. Gourdin, M. Binois, R. Duvigneau, D. Felbacq, S. Khadir, P. Genevet, and S. Lanteri, "Multiobjective statistical learning optimization of RGB metalens," *ACS Photonics*, vol. 8, no. 8, pp. 2498–2508, 2021.
- 7- M. Elsaywy, M. Binois, R. Duvigneau, S. Lanteri, and P. Genevet, "Optimization of metasurfaces under geometrical uncertainty using statistical learning," *Opt. Express*, vol. 29, pp. 29887–29898, 2021
- 8- C. de Souza, S. Lanteri, M. Elsaywy, et al., "Deep learning for large-scale metalenses: design and fabrication," *Laser Photonics Rev.*, submitted, 2025.
- 9- A. C. de Souza, S. Lanteri, and M. Elsaywy *et al.* Back-propagation optimization and multi-valued artificial neural networks for highly vivid structural color filter metasurfaces. *Sci Rep* **13**, 21352 (2023)
- 10- M. Elsaywy, C. Kyrou, E. Mikheeva, E. Colom, J.-Y. Duboz, K. Z. Kamali, S. Lanteri, D. Neshev, and P. Genevet, "Universal active metasurfaces for ultimate wavefront molding by manipulating the reflection singularities," *Laser Photonics Rev.*, vol. 17, p. 2200880, 2023.

Oral GT2 – Physique et ingénierie des structures sous-longueur d'onde

Materials with elastic membranes : negative acoustic density

Juliette Pierre¹, Valentin Leroy² and Benjamin Dollet³

¹ : Institut d'Alembert, Sorbonne Université, CNRS, 75005 Paris, France

² : MSC, University Paris Cité, CNRS, 75013 Paris, France

³ : LIPhy, University Grenoble Alpes, CNRS, 38000 Grenoble, France

juliette.pierre@cnrs.fr

Metamaterials are structured materials that exhibit unique wave-propagation behaviors arising from their microstructure. Among the most frequently discussed exotic properties of metamaterials are negative constitutive parameters, such as negative permeability and/or permittivity in electromagnetism, and negative density and/or compressibility in acoustics.

The concept of « negative density » often appears the most difficult to accept at first sight, since it is hard to imagine a negative gravitational density. In acoustics, however, this notion refers to inertial density, which can indeed take negative values without conceptual difficulty. In a recent theoretical study, we introduced a simple system to illustrate the emergence of negative density, where an elastic response can be interpreted as an inertial response [1]. This system provides analytical expressions and serves as a simplified model that qualitatively reproduces the acoustic behavior observed in several existing membrane-based metamaterials [2–4].

[1] Pierre J, Leroy V, Dollet B. 2022 A toy model for the effective density of acoustic metamaterials. *Proc. R. Soc. A* **478**: 20210861.

[2] Pierre J, Dollet B, Leroy V. 2014 Resonant acoustic propagation and negative density in liquid foams. *Phys. Rev. Lett.* **112**, 148307.

[3] Ma G, Sheng P. 2016 Acoustic metamaterials: from local resonances to broad horizons. *Sci. Adv.* **2**, e1501595

[4] Mälléjac M, Merkel A, Sanchez-Dehesa J, Christensen J, Tournat V, Groby JP, Romero-García V. 2019 Zero-phase propagation in realistic plate- type acoustic metamaterials. *Appl. Phys. Lett.* **115**, 134101

[5] Lee SH, Park CM, Seo YM, Wang ZG, Kim CK. 2009 Acoustic metamaterial with negative density. *Phys. Lett. A* **373**, 4464–4469.

Terahertz metamaterials with ultra-subwavelength confinement for quantum devices

Y. Todorov¹

¹*Laboratoire de Physique et d'Étude des Matériaux, LPEM, UMR 8213, ESPCI Paris, Université PSL, CNRS, Sorbonne Université, F-75005 Paris, France
yanko.todorov@espci.fr*

Metamaterials, consisting in the periodic repetition of artificially designed meta-atoms with dimensions much smaller than the wavelength of interest are often described as high frequency inductor-capacitor (LC) resonators sustaining a resonance [1]. The peculiar ability of metamaterials to efficiently confine the electromagnetic field on a subwavelength scale is at the heart of their macroscopic behavior, and opens new prospects for optoelectronic devices. The LC circuit concentrates the electric field in an extremely small effective volume linked to its capacitive parts. Light-matter interaction occurring in the coupling between an absorber/emitter and the electric field of the capacitors circuit scales as the inverse of the square root of the capacitor volumes and can thus be strongly enhanced.

I will describe the development of a three-dimensional TeraHertz metamaterial LC resonator strongly subwavelength capacitors. This type of structures has been specifically designed for quantum heterostructures that sustain optical activity in the Terahertz frequency range [2]. This metamaterial architecture allows for many degrees of freedom, and in particular its radiation loss can be tailored in a very controllable way [3]. Such metamaterials have recently been used for THz quantum well detectors with reduced dark current [4]. In such structures, we have also experimentally observed the ultra-strong light-matter coupling regime: a peculiar regime of interaction where the vacuum Rabi splitting of the coupled system is comparable to the frequencies of the uncoupled oscillators [5]. I will also discuss the possibility to observe the quantum fluctuations of the light-matter coupled states in such metamaterials [6].

Bibliographie

- [1] J.B. Pendry, A.J. Holden, D.J. Robbins and W.J. Stewart, “Magnetism from conductors and enhanced non-linear phenomena,” *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, **47**, 2075, 1999.
- [2] A. Mottaghizadeh, et al. “Nanoscale electromagnetic confinement in THz circuit resonators”. *Opt. Express* **25**, 28718, 2017.
- [3] M. Jeannin, et al. « *Absorption engineering in an ultra-subwavelength quantum system* ” *Nano Letters* **20** (6) 4430–4436 (2020)
- [4] M. Jeannin, et al. « High temperature metamaterial TeraHertz quantum detector » *Appl. Phys. Lett.* **117**, 251102 (2020)
- [5] A. F. Kockum, A. Miranowicz, S. De Liberato, S. Savasta and F. Nori, “Ultrastrong coupling between light and matter”, *Nature Reviews Physics* **1**, 19–40 (2019).
- [6] U. Iqbal, C. Mora, and Y. Todorov, “Dynamical Coulomb blockade: An all electrical probe of the ultrastrong light-matter coupling regime”, *Phys. Rev. Research* **6**, 033097 (2024).

Propriétés optiques de structures auto-organisées induites par laser dans les films plasmoniques nanocomposites

V. D. Le¹, C. Hubert¹, F. Vocanson¹, N. Destouches¹

¹ : Laboratoire Hubert Curien, Institut d'Optique Graduate School, Université Jean Monnet, CNRS,
Saint-Etienne, France,
Nathalie.destouches@univ-st-etienne.fr

Résumé

L'illumination par laser de couches minces nanocomposites plasmoniques permet d'induire des mécanismes d'auto-organisation conduisant à la formation de structures périodiques à l'échelle sub-micrométrique. Ces travaux présentent une revue de structures auto-organisées produites par laser continu, nanoseconde ou femtoseconde, ainsi que les propriétés optiques qui leur sont associées et montrent des résultats préliminaires d'auto-organisation sur des films minces transférés par laser sur un autre substrat.

1. Introduction

L'activation par laser de mécanismes d'auto-organisation de la matière offre une approche rapide et polyvalente pour la structuration périodique de grandes surfaces ou de volumes jusqu'à l'échelle nanométrique. De nombreux travaux ont étudié ces phénomènes dans des matériaux homogènes, diélectriques, semi-conducteurs et métalliques [1]. Leur activation dans des couches minces nanocomposites plasmoniques, par laser continu ou impulsif, résulte de l'excitation de modes guidés ou de surface dont l'indice effectif définit la période des réseaux induits et la direction de propagation leur orientation [2]. Cela ouvre la voie à la formation, à la demande, en des endroits précis, de nanostructures plasmoniques anisotropes, diffractives ou présentant des réponses spectrales et angulaires complexes [3]. Ces propriétés optiques singulières ont été exploitées pour l'inscription d'images couleurs observables dans des modes d'observation particuliers et pour la création d'images multiplexées se révélant uniquement dans certains modes d'observation [4]. Le traitement par laser de ces couches minces revêt donc un fort intérêt industriel pour des applications liées à la personnalisation de documents sécurisés, la protection de marques ou le stockage de données à haute densité.

Dans cette présentation, nous proposerons une courte revue des mécanismes d'auto-organisation induits par laser et des propriétés optiques des structures qui en découlent. Nous mettrons en évidence les propriétés diffractives et dichroïques de réseaux auto-organisés [5], et nous présenterons des résultats préliminaires démontrant l'auto-organisation, lors du transfert, de couches minces transférées vers un autre substrat par ablation laser.

2. Matériaux et procédés

Les couches minces utilisées dans ces travaux sont élaborées par voie sol-gel et sont constituées de TiO₂ mésoporeux dont les pores renferment du nitrate d'argent ammoniacal partiellement réduit sous forme de nanoparticules de diamètre inférieur à 5 nm. L'épaisseur de ces films est de $180 \text{ nm} \pm 30 \text{ nm}$.

Ces couches minces sont illuminées par un faisceau laser émettant à 532 nm ou 515 nm légèrement focalisé (de diamètre compris entre 12 μm et 30 μm) balayant la surface à vitesse fixe (dans une gamme variant de 10 $\mu\text{m/s}$ à 2 m/s) et à puissance fixe (de quelques mW à quelques centaines de mW). Le laser peut être continu, nanoseconde (fréquence de répétition variant de 10 kHz à 600 kHz) ou femtoseconde (fréquence de répétition de 500 kHz).

3. Résultats

Quel que soit le type de laser utilisé, continu ou impulsif, des réseaux de nanoparticules métalliques auto-organisées, dont la période correspond à une fraction de la longueur d'onde du laser, peuvent être générés en balayant la surface à l'aide d'un faisceau légèrement focalisé. Les phénomènes optiques mis en jeu sont globalement similaires, tout comme les mécanismes physico-chimiques induits par la lumière et par la température atteinte dans le matériau sous l'effet du laser.

Ce qui distingue les différents régimes d'illumination réside principalement dans la température maximale atteinte dans la couche, la cinétique de variation de cette température, ainsi que dans la concomitance ou non des mécanismes thermo- et photochimiques. Les structures formées sous illumination continue, nanoseconde ou femtoseconde, présentent ainsi des différences notables, que nous examinerons.

Une comparaison des temps d'écriture des nanostructures auto-organisées montre que les lasers à impulsions nanosecondes sont les plus efficaces pour ce type de structuration. Ils constituent donc un outil privilégié pour le développement d'applications industrielles. Nous étudierons plus spécifiquement les propriétés optiques des nanostructures ainsi générées.

Enfin, nous montrerons qu'il est possible de transférer partiellement les couches nanocomposites plasmoniques sur un autre support par ablation induite par laser, et que le matériau déposé peut s'auto-organiser au cours de son dépôt (Figure 1).

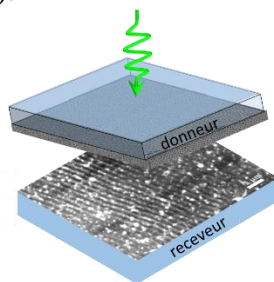


Figure 1 : Principe du transfert de couche induit par laser. La couche nanocomposite plasmonique, initialement déposée sur le substrat donneur, est partiellement transférée vers le substrat récepteur, où elle forme un réseau auto-organisé.

4. Conclusion

Les travaux présentés illustrent la maîtrise croissante des phénomènes d'auto-organisation induits par laser dans les couches nanocomposites plasmoniques. Ils ouvrent des perspectives prometteuses pour la conception de surfaces fonctionnalisées.

5. Remerciements

Ce travail est financé par l'Agence Nationale pour la Recherche, par le projet SLICID (« Impression laser sécurisée d'images couleurs dans les documents d'identité »), ANR-23-CE39-0006 et par le projet ANR-23-EXLU-0003 pour la partie relative au transfert de couche induit par laser.

6. Bibliographie

- [1] Bonse J. et al., Femtosecond Laser-Induced Periodic Surface Structures. *J. Laser Appl.*, **24**, 042006, 2012.
- [2] Liu Z et al., 3D self-organization in nanocomposite layered systems by ultrafast laser pulses, *ACS Nano*, **11** (5), 5031–5040, 2017.
- [3] Sharma N et al., Tailoring nanocomposite materials with ultrashort laser pulses for applications in photonics, *Nanoscale*, **11**, 18779, 2019.
- [4] Dalloz N et al., Anti-counterfeiting white light printed image multiplexing by fast nanosecond laser processing, *Adv. Mater.*, **34**, 2104054, 2022.
- [5] Le V D et al., Understanding and exploiting the optical properties of laser-induced quasi-random plasmonic metasurfaces, *ACS Appl. Opt. Mater.*, **2**, 373–385, 2024.

Oral GT3 – Capteurs, imagerie et inversion

Mesure magnétique par électronique de spin : état de l'art et innovations

Myriam Pannetier Lecoeur

SPEC - CEA Saclay – CNRS UMR3680, 91191 Gif-sur-Yvette, France

Spin electronics combines electronic transport with an additional degree of freedom, provided by the magnetic moment, or spin, of the electron. This gives rise to specific transport properties in magnetic materials at small scales. This nanoscale magnetism has led to the emergence of new effects and has numerous applications, from reading information on hard disks and magnetic memories to measuring magnetic fields with miniaturised, highly sensitive sensors.

In this presentation, I will outline the principles of magnetic measurement using spin electronics, its main characteristics (signal, noise, integration, etc.), recent innovations, and illustrate these with applications in the field of magnetic imaging and biological signal measurement.

L'électronique de spin associe au transport électronique un degré de liberté supplémentaire, celui apporté par le moment magnétique, ou spin, de l'électron. Ainsi émergent des propriétés de transport particulières dans des matériaux magnétiques aux petites échelles. Ce magnétisme à échelle nanométrique ont permis de faire émerger de nouveaux effets et se déclinent dans de nombreuses applications, depuis la lecture d'information dans les disques durs, les mémoires magnétiques mais aussi la mesure du champ magnétique avec des capteurs miniaturisés et très sensibles.

Dans cet exposé, je présenterai les principes de la mesure magnétique grâce à l'électronique de spin, ses principales caractéristiques (signal, bruit, intégration...), ses innovations récentes et illustrerai par des applications dans le domaine de l'imagerie magnétique et de la mesure de signaux biologiques.

Apprentissage automatique de modèles complexes pour la projection d'images 3D à travers des fibres optiques multimodales

V. Kermène¹, J. Saucourt¹, B. Gobé¹, S. Gharbi², K. Vasko³, B. Debord³, F. Gérôme³, F. Benabid³, S. Vergnole², D. Helbert⁴, A. Desfarges-Berthelemot¹,

¹ Université de Limoges, CNRS, XLIM, UMR 7252, F-87000 Limoges, France

² ALPHANOV, 12 rue Gemini, 87280 Limoges, France

³ GPPMM group, XLIM Research Institute, CNRS UMR 7252, 87100 Limoges, France

⁴ Université de Poitiers, CNRS, XLIM, UMR 7252, F-86000 Poitiers, France

Vincent.kermene@xlim.fr

Résumé

Nous présentons un processus d'apprentissage profond, dédié à la modélisation de fibres fortement multimodales, établissant la correspondance entre les champs complexes d'entrée et de sortie de fibre. Le façonnage 3D du champ de sortie de fibre atteste de la capacité des modèles appris à restituer fidèlement l'amplitude et la phase du champ propagé par la fibre.

1. Introduction

Ces dernières années, l'intérêt pour les fibres multimodales (MMF) en tant que support de transmission d'informations s'est considérablement accru dans divers domaines applicatifs tels que les communications optiques, l'imagerie endoscopique et les sources lasers en raison des nombreux degrés de liberté apportés par les modes des MMF. En particulier, ces fibres se révèlent être des candidates séduisantes pour transmettre ou délivrer des images. Cependant, l'information en sortie de fibre est dégradée par les couplages et interactions intermodales se produisant tout au long de la fibre qui produisent un champ de tavelures (speckle). Cette propagation peut être modélisée par une matrice de transmission [1] dans le cas de transformations linéaires mais aussi par un réseau de neurones, particulièrement pertinent pour décrire des régimes de propagation non linéaires. Un défi majeur consiste à développer un modèle neuronal capable de relier les champs complexes d'entrée et de sortie de MMF uniquement à partir de données de sortie intensimétriques, sans dispositif interférométrique, ni onde de référence. Ce modèle est alors adapté à la projection d'images 3D en sortie de fibre. Les modèles de réseaux à données complexes les plus proches cherchent à faire de la décomposition modale [2], mais sont limités à des fibres à quelques modes. L'objectif de nos travaux est de proposer un processus d'apprentissage profond qui permette de modéliser la transformée entre les champs complexes d'entrée et de sortie d'une fibre à grand nombre de modes [3,4].

2. Principe du processus d'apprentissage profond proposé

Le modèle A est une matrice de transmission (MT) ou un réseau de neurones convolutif (CNN) de type U-Net qui décrit la transformation entre les champs complexes échantillonnés $x \in \mathbb{C}^{n \times n}$ en entrée de FMM et le champ $y \in \mathbb{C}^{n \times n}$ en sortie ($n \times n$ échantillons) : $y = CNN(x)$ (voir Figure 1). Pour cela, nous utilisons un lot de cartes de phases, affichées sur le SLM (Spatial Light Modulator) en amont de la MMF, pour produire autant de champs d'entrée complexes x . En sortie de fibre, nous mesurons avec deux caméras les images intensimétriques $|y|^2$ et $|z|^2$ correspondantes, z étant le champ lointain (CL) du champ y dans le plan de sortie de la fibre (champ proche CP). L'originalité de notre approche est

d'entraîner le modèle à partir de triplets de données $[x, |y|^2, |z|^2]$ pour prédire le champ complexe en sortie de fibre optique.

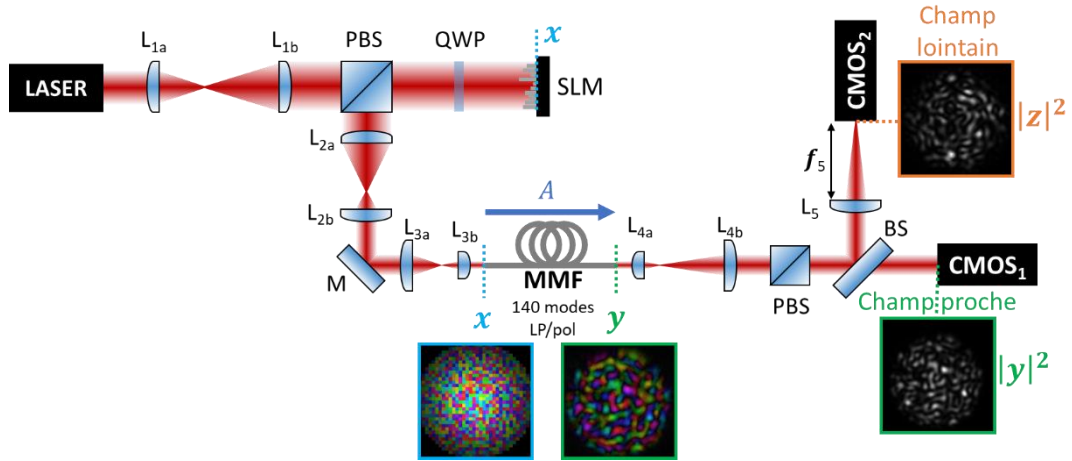


Figure 1. Banc expérimental schématisé pour l'apprentissage automatique de modèles de fibres fortement multimodales, complexe à complexe et pour la projection d'images 2D ou 3D.

3. Projection de profils de champs complexes contrôlés en sortie de fibre multimodale à l'aide de son modèle entraîné par apprentissage automatique

Des projections de champs complexes en sortie de MMF sont démontrés expérimentalement. La structuration du champ, par SLM, en entrée de fibre est optimisée à l'aide des modèles entraînés par apprentissage automatique tel que décrit précédemment. L'exemple de projections expérimentales de champs complexes contrôlés, tels que des modes LP et OAM, sont montrés sur la Figure 2.

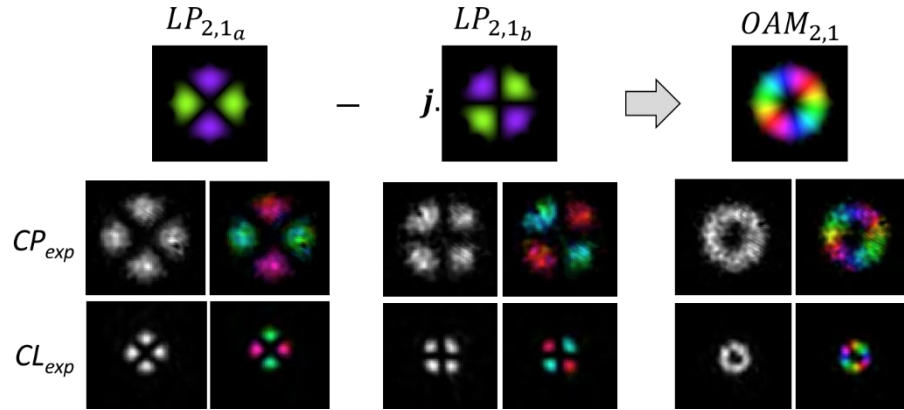


Figure 2 : Exemples expérimentaux de projection de champs complexes contrôlés en sortie de fibre multimodale (modes LP et OAM) à l'aide d'un modèle entraîné par apprentissage automatique.

4. Conclusion

Nous avons mis en œuvre, numériquement et expérimentalement, un processus d'apprentissage profond original par matrice de transmission ou par réseau de neurones, adapté à la modélisation d'une fibre multimodale. Ces modèles qui calculent la transformée entre champs complexes d'entrée et de sortie de fibres à grand nombres de modes, sont appris sans montage interférométrique ni onde de référence. Nous avons également montré qu'avec ces modèles, il est possible de réaliser un

façonnage en champ du faisceau de sortie de MMF, ouvrant la voie à la projection 3D à travers ce type de fibre.

5. Remerciements

Les auteurs remercient le LABEX AMIES, la plateforme PLATINOM soutenue par le FEDER et la région Nouvelle Aquitaine (FEDER PILIM) et l'ANRT (CIFRE2024/0450).

6. Bibliographie

- [1] J. Carpenter, et al., "110x110 optical mode transfer matrix inversion," Opt. Express 22, 96-101, 2014.
- [2] Tian et al, "High-performance mode decomposition using physics- and data-driven deep learning", Vol. 30, No. 22 / 24 Oct 2022 / Optics Express
- [3] B. Gobé, J. Saucourt, M. Shpakovych, et al., "Retrieving the complex transmission matrix of a multimode fiber by machine learning for 3D beam shaping," J. Lightwave Technol. 42(13), 4681–4688 (2024).
- [4] J. Saucourt, B. Gobé, D. Helbert, et al., "Machine learning-driven complex models for wavefront shaping through multimode fibers," Opt. Fiber Technol. 88, 104017 (2024).

Reflection Matrix Imaging: From quantitative ultrasound to deep optical microscopy and passive seismology

Alexandre Aubry
Institut Langevin, ESPCI Paris, PSL University, CNRS, 75005 Paris, France

Résumé

A matrix approach to wave propagation in complex media is developed to exploit disorder for deep and high-resolution imaging. Applications range from seismic waves for earthquake and volcano monitoring to light for imaging biological tissue and acoustic waves for medical ultrasound.

In wave imaging, we aim at characterizing an unknown environment by actively probing it and then recording the waves reflected by the medium. It is, for example, the principle of ultrasound imaging, optical coherence tomography for light or reflection seismology in geophysics. However, wave propagation from the sensors to the focal plane is often degraded by the heterogeneities of the medium itself. They can induce wave-front distortions (aberrations) and multiple scattering events that can strongly degrade the resolution and the contrast of the image. Aberration and multiple scattering thus constitute the most fundamental limits for imaging in all domains of wave physics.

However, the emergence of large-scale sensors array and recent advances in data science pave the way towards a next revolution in wave imaging. In that context, we have developed a universal matrix approach of wave imaging in heterogeneous media. Such a formalism is actually the perfect tool to capture the input-output correlations of the wave-field with a large network of sensors. This matrix approach allows to overcome aberrations over large imaging volumes, thus breaking the field-of-view limitations of conventional adaptive focusing methods [1,2]. It also leads to the following paradigm shift in wave imaging: Whereas multiple scattering is generally seen as a nightmare for imaging, the matrix approach takes advantage of disorder for high-resolution [3] and ultra-deep [4] imaging. Besides direct imaging applications, this project will also provide a high-resolution tomography of the wave velocity [5] and a promising characterization tool based on multiple scattering quantification [6]. Based on all these advances, the ultimate goal of this project will be to develop an information theory of wave imaging. All these concepts are applied both in optics [7] (for in-depth imaging of biological tissues), ultrasound imaging [8] (for medical diagnosis) and seismology [3] (for monitoring of volcanoes and fault zones).

Bibliographie

- [1] F. Bureau, J. Robin, A. Le Ber, W. Lambert, M. Fink and A. Aubry, Three-Dimensional Ultrasound Matrix Imaging, *Nature Commun.* 14, 6793, 2023
- [2] U. Najar, V. Barolle, P. Balondrade, M. Fink, A. C. Boccara and A. Aubry, Harnessing Forward Multiple Scattering for Optical Imaging Deep Inside an Opaque Medium, *Nature Commun.* 15, 7349, 2024
- [3] E. Giraudat, A. Burtin, A. Le Ber, M. Fink, J.-C. Komorowski and A. Aubry, Matrix Imaging as a Tool for High-Resolution Monitoring of Deep Volcanic Plumbing Systems with Seismic Noise, *Comm. Earth Environ.* 5, 509, 2024
- [4] A. Le Ber, A. Goicoechea, L. M. Rachbauer, W. Lambert, X. Jia, M. Fink, A. Tourin, S. Rotter, A. Aubry, Detection and Characterization of Targets in Complex Media using Fingerprint Matrices, *Nature Physics*, 2025
- [5] F. Bureau, E. Giraudat, A. Le Ber, W. Lambert, L. Carmier, A. Guibal, M. Fink, A. Aubry, Reflection Matrix Imaging for Wave Velocity Tomography, *arXiv:2409.13901*, 2024
- [6] A. Goicoechea, C. Brütt, A. Le Ber, F. Bureau, W. Lambert, C. Prada, A. Derode, A. Aubry, Reflection Measurement of the Scattering Mean Free Path at the Onset of Multiple Scattering, *Phys. Rev. Lett.* 133, 176301, 2024
- [7] F. Bureau, L. Denis, A. Coudert, M. Fink, O. Couture, A. Aubry, Ultrasound matrix imaging for 3D transcranial in-vivo localization microscopy, *Sci. Adv.* 11, eadt9778, 2025
- [8] P. Balondrade, V. Barolle, N. Guigui, E. Auriant, N. Rougier, C. Boccara, M. Fink, A. Aubry, Multi-Spectral Reflection Matrix for Ultra-Fast 3D Label-Free Microscopy, *Nature Photonics* 18, 1097–1104, 2024

Oral GT4 – Antennes et circuits : des micro-ondes aux ondes millimétriques et THz

Metamaterial-Based Waveguides and Leaky-Wave Antennas from Modeling Challenges to Sensing Applications

G. Valerio

*Laboratoire de Génie Electrique et Electronique de Paris (GeePs),
Sorbonne Université, CNRS, CentraleSupélec, Université Paris Saclay
guido.valerio@sorbonne-universite.fr*

Résumé

Examples of metamaterial-based guided-wave structures are proposed for different sensing applications.

Automotive radars operating at millimeter waves strive to reduce fabrication costs leading to low-cost manufacturing techniques, such as printed circuit board (PCB). Contactless air-filled substrate-integrated waveguides are an attractive solution, but their realization is not straightforward in stacked configurations. We propose a simple solution for the design of a PCB-based Electromagnetic Bandgap (EBG) metamaterial, suitable for the development of staked EBG in CLAF waveguides.

Other natural candidates for sensing at millimeter waves are leaky-wave antennas, thanks to their frequency-scanning properties. However, their application at millimeter waves is limited due to design difficulties and complex tradeoffs (size, losses, bandwidth). Designs of all-metal corrugated leaky-wave antennas are discussed, starting from analyses performed with a rigorous periodic Method of Moments.

Résonateur coaxial à saut d'impédance pour filtres Tx en environnement spatial

Eric Rius, Jessica Benedicto, Jean-François Favennec et al

Lab-STICC, Université de Brest, Brest, France

Résumé

Pour les filtres volumiques Tx radiofréquences, en particulier ceux utilisés sur les charges utiles des satellites, des solutions miniatures avec de bonnes performances électriques et une bonne résistance au multipactor sont nécessaires. Les performances électriques incluent notamment la sélectivité, les pertes d'insertion, la platitude dans la bande passante et la largeur de la bande atténuée. Toutefois, il faut trouver un compromis entre la compacité, le facteur de qualité et l'immunité à l'effet multipactor. Le multipactor est une avalanche électronique dans le vide qui peut entraîner une perturbation du signal pouvant aller jusqu'à la mise hors service de la voie de transmission. Il dépend du champ RF (fréquence et puissance), de la géométrie de la structure et de la surface du matériau (en particulier de ses propriétés d'émission d'électronique). Pour un matériau donné, généralement un bon conducteur électrique, et une bande de fréquence donnée, fixée par l'application, la seule façon de limiter l'effet multipactor est d'élargir les zones de fragilité du filtre, ce qui va à l'encontre de la miniaturisation. Il n'y a pas de solution universelle, et il faut choisir la topologie la mieux adaptée à ses besoins et optimiser la structure pour obtenir le meilleur compromis. Les topologies possédant des degrés de liberté sont des solutions idéales pour un tel objectif.

Les résonateurs coaxiaux à saut d'impédance (SIR) ont plusieurs degrés de liberté, à la fois dans les dimensions transverse et longitudinale. Ces résonateurs, qui supportent les modes TEM, présentent des facteurs de qualité compris entre 1K et 5K.

Pour une telle topologie, plusieurs structures coaxiales sont imbriquées les unes dans les autres. En termes de schéma électrique, le modèle est une succession de sections coaxiales en cascade, où le conducteur de masse de l'une devient l'âme central de la suivante, et vice versa. Une propriété avantageuse des SIR est qu'ils permettent de moduler la longueur du résonateur et l'éloignement de l'harmonique suivante. L'effet SIR dépend du rapport des impédances caractéristiques de deux sections coaxiales adjacentes. Pour un résonateur à deux sections, le rapport d'impédance est unique, alors que pour un résonateur à trois, quatre ou n sections, il est nécessaire de définir un rapport d'impédance équivalent M_{eq} . Quel que soit le nombre de sections, M_{eq} permet de caractériser électriquement le résonateur en termes de fréquence fondamentale, de zéros de transmission et d'harmoniques. Selon le nombre de sections, ces fréquences peuvent être indépendantes. L'ajout d'une section permet d'élargir l'espace minimal entre les cylindres, donc de diminuer la sensibilité aux variations technologiques de fabrication et d'améliorer l'immunité aux phénomènes multipactor.

Électronique à l'état solide de type III-As et III-N pour applications hyperfréquences

M. Zaknoute¹

¹ : CNRS-IEMN, Université de Lille, UMR8520, Av. Poincaré, 59650 Villeneuve d'Ascq, France
mohammed.zaknoute@univ-lille.fr

Résumé

Les travaux menés portent sur le développement et l'optimisation de dispositifs semiconducteurs à base de matériaux III-V, avec un accent particulier sur les transistors bipolaires à hétérojonction (DHBT), les photodiodes ultra-rapides (UTC) et les diodes Schottky en GaN et GaAs. Ces composants sont conçus pour répondre aux exigences croissantes des systèmes de communication à très haute fréquence, des modules de conversion de puissance, et des environnements extrêmes.

Les DHBT sur InP, transférés sur substrats à haute conductivité thermique, ont démontré des performances record en fréquence et en puissance à 94 GHz, grâce à une réduction significative de la résistance thermique. Ces résultats ouvrent la voie à des circuits intégrés THz plus efficaces et plus robustes.

Les photodiodes UTC sur InP, quant à elles, permettent une conversion optoélectronique ultra-rapide, essentielle pour les télécommunications à très haut débit et la génération de signaux RF par photodétection. Leur conception repose sur une ingénierie fine du transport de porteurs et une intégration compatible avec les plateformes photoniques.

Enfin, les diodes Schottky en GaN sont explorées pour leurs capacités en commutation rapide et en multiplication de fréquence, avec une attention particulière portée à la tenue en tension, à la stabilité thermique des contacts, et à la compatibilité avec des environnements sévères tels que l'exploration spatiale. Bien que les diodes Schottky en GaAs soient historiquement utilisées pour la multiplication de fréquence, leurs limitations en tenue de puissance motivent l'intérêt croissant pour le GaN, dont la tension de claquage plus élevée et la conductivité thermique supérieure permettent d'envisager des sources sub-THz plus robustes. Les études comparatives sur les métallisations et les traitements thermiques visent à améliorer la reproductibilité et la fiabilité des dispositifs, tout en consolidant les avantages du GaN face aux technologies conventionnelles.

Ces travaux de recherches en technologie pour les applications THz s'inscrivent dans une démarche alliant fabrication et caractérisation pour repousser les limites de l'électronique haute fréquence et de puissance, tout en anticipant les besoins des futures générations de systèmes embarqués et communicants.

Oral GT5 – Compatibilité électromagnétique

La recherche en CEM pour l'aéronautique - 40 ans de moments clefs et défis vus au travers de l'ONERA

Jean-Philippe Parmantier * ¹

¹ ONERA (Onera) – DGA – 2 avenue Edouard Belin 31055 TOULOUSE, France

*Intervenant

Caractérisation et modélisation CEM en électronique de puissance

S. Serpaud¹

¹ IRT Saint Exupéry – Toulouse, France
sebastien.serpaud@irt-saintexupery.com

Résumé

Ce papier présente une synthèse sur la caractérisation des composants et la modélisation des émissions dans le domaine de l'électronique de puissance.

1. Introduction

L'électronique de puissance joue un rôle important dans de nombreuses applications modernes : traction électrique, conversion d'énergie, énergies renouvelables, etc. Ces systèmes génèrent des perturbations électromagnétiques (EMI) susceptibles d'affecter le fonctionnement d'autres équipements électroniques.

L'émergence des composants WBG, tels que le SiC et le GaN, a profondément transformé le paysage de l'électronique de puissance. L'augmentation des fréquences de découpage permet une amélioration significative du rendement en puissance tout en réduisant le volume et le poids global du système. Mais elle génère aussi d'importantes contraintes de Compatibilité ÉlectroMagnétique (CEM). Les fortes commutations (dv/dt , di/dt) accroissent les risques de couplage parasite augmentant fortement les niveaux, mais aussi la largeur spectrale, des émissions conduites et rayonnées des dispositifs de puissance.

La caractérisation CEM des composants de puissance (transistors, modules, moteur) pour l'évaluation des émissions des dispositifs électroniques est indispensable pour anticiper les risques de non-conformité. L'utilisation de composants SiC et le GaN impose une modélisation des éléments parasites beaucoup plus fine et sur une plus large bande de fréquence. Ce qui n'était pas nécessaire avec les technologies à base d'IGBT [1].

2. Caractérisation et modélisation CEM en électronique de puissance

Il est nécessaire de disposer des modèles élémentaires de l'ensemble des constituants d'une chaîne électromécanique (Figure 1) afin de modéliser les perturbations émises par cette dernière. L'hétérogénéité de ces constituants demande d'avoir des méthodes de modélisation spécifiques [2] [3] [4]. Une approche « basée mesure » et une autre « basée simulation » seront présentées.

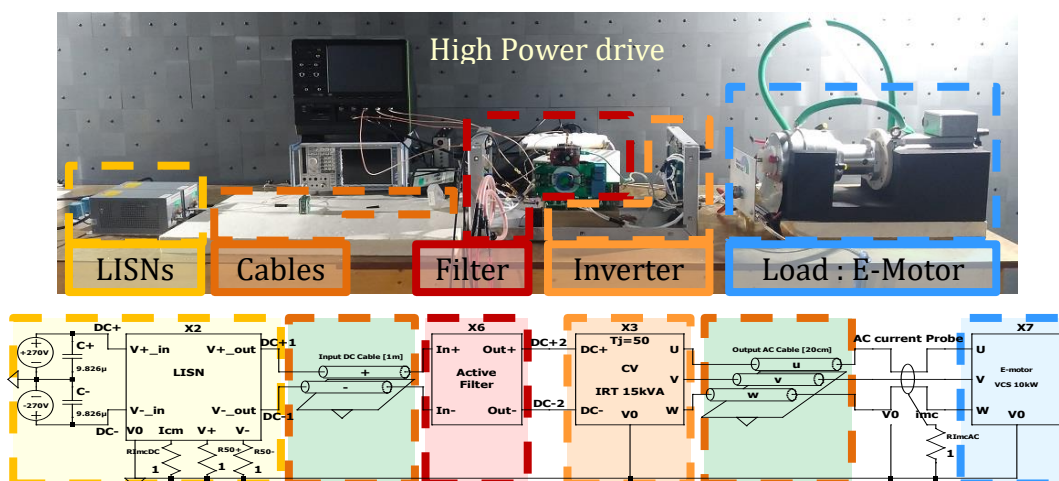


Figure 1. Modèle complet d'une chaîne électromécanique de forte puissance.

En complément du modèle de la chaîne, il convient de modéliser l'environnement normatif permettant la mesure des émissions. Dans le cadre des émissions conduites, suivant la norme utilisée (domaine : Aéronautique, Automobile, Civil, Spatial...), il est nécessaire de modéliser les câbles, le(s) réseau(x) de stabilisation de ligne (RSIL ou LISN en anglais), les pinces de courant sans oublier l'équipement de mesure utilisé (exemple : effet du RBW sur un analyseur de spectre).

Plusieurs facteurs compliquent la modélisation CEM :

- Le facteur multi échelle des dispositifs électroniques : du nm (transistor) au mètre (câble, boîtier)
- La nature multi-physique des dispositifs électroniques : électrique, thermique et mécanique
- La très grande largeur de bande des signaux électriques : du Hz au GHz
- Le manque d'information sur les caractéristiques physiques des matériaux : notion d'incertitude

Face à cela, l'utilisation d'approches de modélisation dit « exacte » ou « Full-wave » reste limitée. Il est difficile de modéliser un système complexe sur lequel on a très peu d'information. On obtient rarement satisfaction par une approche full simulation. L'approche par la mesure se confronte à la sensibilité limitée des instruments de mesure et la faible accessibilité des dispositifs (éloignement entre la grandeur de mesure et la mesurande). Il est également nécessaire de traiter les fonctions de transfert des capteurs utilisés, ce qui peut sérieusement impacter la précision de mesure. Une approche hybride est souvent la plus pertinente.

Aujourd'hui, l'utilisation d'outils statistiques devient indispensable pour gérer les incertitudes (définition des matériaux, erreur de mesure, prise en compte des marges...). Si l'on couple ces outils aux dernières innovations autour des méthodes de régression (IA), il est maintenant possible de disposer de méthodes de modélisation plus précises permettant de prendre en compte l'aspect multidisciplinaire (ex : optimisation CEM et thermique).

3. Conclusion

Au vu de la complexification de l'électronique de puissance et des exigences normatives toujours plus strictes, la caractérisation et la modélisation CEM deviennent indispensables pour garantir la conformité et la fiabilité des dispositifs électroniques. La modélisation CEM, dès la phase de conception, contribue à orienter le design afin de limiter les risques de non-conformités, permettant ainsi de concevoir des systèmes plus robustes dans des environnements électromagnétiques toujours plus contraints. C'est un outil indispensable pour réduire le temps et le coût du développement de ces dispositifs complexes. Sa maîtrise devient un enjeu majeur pour les équipes de développement afin de rester compétitif.

4. Remerciements

Nous remercions l'ensemble des partenaires de l'IRT Saint-Exupéry, les industriels et les universitaires pour leur soutien financier et en nature (connaissances et services) ainsi que l'Agence nationale de la recherche pour son soutien financier.

5. Bibliographie

- [1] H. Dai, R. A. Torres, T. M. Jahns and B. Sarlioglu, "Comparative Study of Conducted Common-Mode EMI in WBG-Enabled DC-Fed Three-Phase Current-Source Inverter," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 10, no. 6, pp. 7188-7204, Dec. 2022, doi: 10.1109/JESTPE.2022.3161422.
- [2] Yan, J.; Wu, H.; Fu, X.; Li, M.; Yu, Y. Modeling and Suppression of Conducted Interference in Flyback Power Supplies Based on GaN Devices. *Electronics* 2024, 13, 2360. <https://doi.org/10.3390/electronics13122360>
- [3] Wu, X.; Gao, X.; Wang, J.; Li, Z.; Du, S.; Gao, S.; Li, F.; Du, J.; Shchurov, N.I.; Zhang, X. Advances in Modeling and Suppression Methods of EMI in Power Electronic Converters of Third-Generation Semiconductor Devices. *Electronics* 2023, 12, 2348. <https://doi.org/10.3390/electronics12112348>.
- [4] R. Drummond, G. Almeida, B. Cougo, et al. Modeling of Integrated CM/DM Inductors in EMI Filters for High Power Density Converters. In : 2024 Energy Conversion Congress & Expo Europe (ECCE Europe). IEEE, 2024. p. 1-8.

Attaques par perturbations sur les composants embarqués : techniques existantes et défis actuelsThomas Hiscock¹¹ : Univ. Grenoble Alpes, CEA, LETI, MINATEC Campus,
F-38054 Grenoble, France. firstname.name@cea.fr**1. Description**

Les attaques par perturbation constituent un vecteur d'attaque important pour les composants embarqués. Elles consistent à modifier les conditions physiques de fonctionnement d'un système dans le but d'extraire des données sensibles, de modifier le fonctionnement ou encore de gagner en privilèges sur le système. Initialement utilisées dans le domaine assez fermé de la carte à puce, on voit ces dernières années ces attaques être mises en œuvre sur la plupart des systèmes embarqués : automobile [1], terminaux star-link [2], chips radios [3], [4] ou encore les téléphones mobiles [5].

Dans cette présentation, nous introduirons les principaux moyens d'injections de fautes utilisés dans les caractérisations sécuritaires de produits : les glitches d'horloge et de tension [6], les perturbations électromagnétiques [7] et les perturbations laser [8]. Il s'agira notamment de présenter le matériel nécessaire, les paramètres associés. Pour chaque technique, nous aborderons brièvement les modélisations connues de ces phénomènes.

Enfin, en guise d'ouverture, la présentation abordera quelques sujets de recherches actuels dans le domaine.

La présentation se veut donc une introduction générale au sujet des attaques par perturbation, accessible à un public non familier avec le domaine de la sécurité.

6. Bibliographie

- [1] "Bypassing the Renesas RH850/P1M-E read protection using fault injection," I CAN Hack. Accessed: Jun. 13, 2025. [Online]. Available: <https://icanhack.nl/blog/rh850-glitch/>
- [2] L. Wouters, "A Black-Box Security Evaluation of SpaceX Starlink User Terminal." in DEF CON 30. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5446/62225>
- [3] LimitedResults, "nRF52 Debug Resurrection (APPROTECT Bypass) Part 1," LimitedResults. Accessed: Mar. 08, 2025. [Online]. Available: <https://limitedresults.com/2020/06/nrf52-debug-resurrection-appprotect-bypass/>
- [4] LimitedResults, "Pwn the ESP32 Forever: Flash Encryption and Sec. Boot Keys Extraction," LimitedResults. Accessed: Mar. 22, 2025. [Online]. Available: <https://limitedresults.com/2019/11/pwn-the-esp32-forever-flash-encryption-and-sec-boot-keys-extraction/>
- [5] H. Marco and V. Arnau, "A Blind VCC Glitching technique to bypass the secure boot of the Qualcomm MSM8916 mobile SoC," presented at the Blackhat europe 2022, 2022.
- [6] N. Selmane, S. Bhasin, S. Guilley, and J.-L. Danger, "Security evaluation of application-specific integrated circuits and field programmable gate arrays against setup time violation attacks," IET information security, vol. 5, no. 4, pp. 181–190, 2011.
- [7] J.-J. Quisquater and D. Samyde, "Eddy current for magnetic analysis with active sensor," in Proceedings of eSMART, 2002, pp. 185–194.
- [8] J.-M. Schmidt and M. Hutter, "Optical and EM Fault-Attacks on CRT-based RSA: Concrete Results: Austrochip 2007," Austrochip 2007, pp. 61–67, 2007.

Oral GT6 – Imagerie en milieux
complexes : modélisation, instruments,
traitements

Apport des théories de multi-diffusion à l'interprétation des données de sismologie planétaire : l'exemple de la mission InSight sur Mars

Ludovic Margerin¹

¹ : Institut de Recherche en Astrophysique et Planétologie,
 ludovic.margerin@irap.omp.eu

Résumé

Je présenterai quelques faits marquants obtenus dans le cadre de la mission d'exploration géophysique InSight sur Mars en illustrant plus particulièrement l'apport des théories de propagation et de transport des ondes sismiques en milieu complexe.

1. Introduction

Le 26 Novembre 2018, l'atterrisseur InSight pour "Interior exploration using Seismic Investigation, Geodesy and Heat Transport" s'est posé avec succès sur Elysium Planitia, à proximité de l'équateur Martien. Equipé d'un sismomètre large-bande, InSight a écouté l'activité interne de la planète rouge pendant près de deux années martiennes, fournissant ainsi de précieuses informations sur sa structure.

2. Objectifs et apports d'InSight

Mars étant beaucoup moins massive que la Terre, son activité géologique s'est arrêtée prématurément, préservant ainsi des structures primitives qui ont été effacées par la dynamique interne sur Terre. En explorant l'intérieur de Mars, InSight ouvre ainsi une fenêtre d'observation sur le passé de notre système solaire. A l'issue de la mission, le sismomètre SEIS a détecté des centaines d'événements sismiques, certains d'origine externe (impacts), d'autres vraisemblablement internes en lien avec une faible activité tectonique et volcanique. InSight a également permis de préciser la profondeur des principales discontinuités internes et a mis en évidence la présence d'un noyau de Fer plus gros qu'attendu.

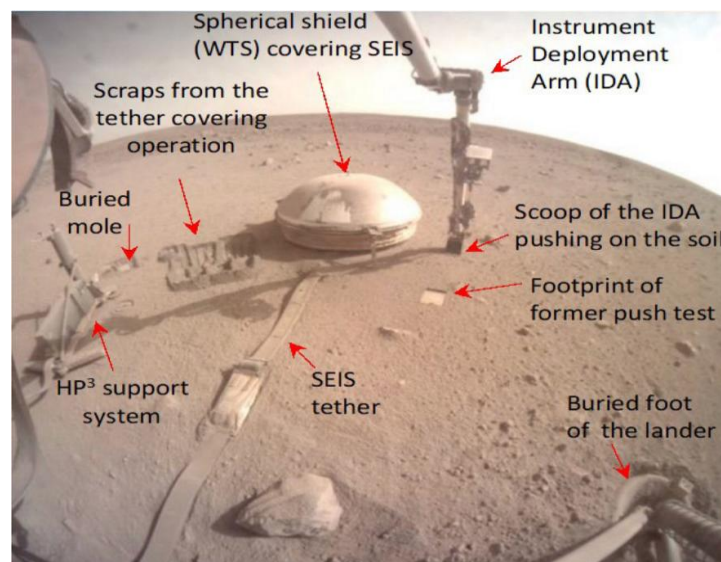


Figure 1. Photographie du sismomètre SEIS et du pénétrateur HP3 sur Mars ([1])

3. Intérêt de la multi-diffusion

Je montrerai que la très grande majorité des signaux sismiques détectés par InSight portent la signature de la multi-diffusion. J'illustrerai l'intérêt de concepts -comme l'équipartition et le théorème de fluctuation dissipation- et de modèles -comme le transport radiatif- pour comprendre l'origine des signaux martiens et construire des modèles d'hétérogénéité et d'anélasticité de l'intérieur de Mars. Je présenterai des applications concrètes aux données et j'exposerai les principaux résultats obtenus sur la stratification de la croûte martienne ([2],[3]), son épaisseur, sa nature et son possible contenu en eau ([4],[5]).

Enfin, je montrerai comment l'étude du bruit de fond sismique nous a permis de détecter des variations saisonnières de vitesses sismiques dans le régolithe martien en lien avec son comportement thermo-élastique ([6]).

4. Remerciements

L'auteur remercie vivement tous les étudiant.e.s qui ont contribué à ces travaux : S. Menina, J. Marti, N. Compaire, S. Carrasco, A. Delsuc, ainsi que les collègues de la mission InSight et plus particulièrement : R. Garcia, N. Murdoch, T. Kawamura, P. Lognonné, B. Knapmeyer-Endrun, M. Calvet, M. Monnereau

6. Bibliographie

- [1] Delage et al., Investigating the Martian Soil at the InSight landing site, *Soils and Rocks*, vol. **47**, e2024005023, 2024.
- [2] Knapmeyer-Endrun et al., Thickness and structure of the martian crust from InSight seismic data, *Science*, vol. **373**, 10.1126/science.abf8966, 2021.
- [3] Carrasco et al., Empirical H/V spectral ratios at the InSight landing site and implications for the martian subsurface structure, *Geophys. J. Int.*, vol. **232**, e2024005023, 2024.
- [4] Lognonné et al., Constraints on the shallow elastic and anelastic structure of Mars from InSight seismic data, *Nature Geoscience*, vol. **13**, pp 213-220, 2020.
- [5] Menina et al., Stratification of Heterogeneity in the Lithosphere of Mars From Envelope Modeling of Event S1222a and Near Impacts: Interpretation and Implications for Very-High Frequency Events, *Geophys. Res. Lett.*, vol. **50**, e2023GL103202, 2023.
- [6] Compaire et al., Seasonal variations of subsurface seismic velocities monitored by the SEIS-InSight seismometer on Mars, *Geophys. J. Int.*, vol. **229**, pp 776-799, 2022.

Freeform Hadamard spectral imaging

N Ducros^{1,2}

¹ INSA-Lyon, UCBL 1, CNRS, Inserm, CREATIS UMR 5220, U1294, F-69691, Lyon, France,

² Institut Universitaire de France (IUF), France

nicolas.ducros@creatis.insa-lyon.fr

Résumé

Depuis les travaux de Duarte et al. (2008), l'imagerie « single-pixel » est associée à la théorie du compressed sensing. Bien que plus ancien, le concept de spectroscopie de Hadamard (Harwitt et Sloane, 1979) reste riche d'enseignements lorsqu'il s'agit d'analyser l'erreur quadratique moyenne (EQM) des images obtenues par imagerie single-pixel.

Après avoir décrit quelques mises en œuvre récentes de techniques d'imagerie hyperspectrale single-pixel, nous analyserons l'EQM de reconstruction associée aux matrices d'acquisition classiquement dérivées de matrices de Hadamard, sous l'hypothèse d'un bruit de Poisson-Gauss qui prévaut généralement en pratique.

Constatant que la suppression de pixels du champ de vue a pour effet de réduire l'EQM de reconstruction, nous proposons un mode d'acquisition dit « libre » dans lequel seul un sous-ensemble des pixels est observé. Grâce aux modulateurs spatiaux de lumière que l'on peut contrôler de façon informatique, la mise en œuvre d'un tel mode d'acquisition est particulièrement commode.

Sur le plan conceptuel, l'imagerie libre peut être réalisée au moyen de matrices d'acquisition « masquées », dont certaines colonnes sont mises à zéro, ou au moyen de matrices dont les lignes s'appliquent directement au sous-ensemble de pixels appartenant à la zone libre. Cette dernière façon de procéder peut réduire davantage l'EQM de reconstruction par rapport à une matrice d'acquisition masquée.

Nous avons quantifié théoriquement l'EQM d'images libres et validé nos résultats à partir de simulations et d'acquisitions expérimentales. En présence de faibles flux lumineux pour lesquels notre approche est la plus pertinente, nous avons observé des gains significatifs, de l'ordre de 17 à 25 dB par rapport au balayage d'un point de mesure dans la zone libre, et de l'ordre de 6 à 7 dB pour une acquisition single-pixel complète.

Bibliographie

M. Duarte, M. Davenport, D. Takhar, J. Laska, T. Sun, K. Kelly, and R. Baraniuk, "Single-Pixel Imaging via Compressive Sampling," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. **25**, no. 2, pp. 83–91, Mar. 2008.

M. Harwit and N. J. A. Sloane, *Hadamard Transform Optics*. Academic Press, 1979.

Thermalization of photons in disordered scattering media

V. Krachmalnicoff¹, L. Soncin¹, Y. De Wilde¹, R. Pierrat¹, R. Carminati¹

¹ *Institut Langevin, ESPCI Paris, CNRS, PSL University, Paris, France*

valentina.krachmalnicoff@espci.fr

Sun or light bulbs are examples of black body sources that we encounter every day. Black body radiation is described by the Planck's law that states that the number of emitted photons and their wavelength is driven by the temperature of the black body itself. In such source, photons exhibit a vanishing chemical potential, meaning that their number is not conserved when the temperature of the black body is varied. It has been shown that a different behavior can be observed for photons emitted by laser-pumped Rhodamine fluorescent molecules in a cavity. By promoting multiple absorption-emission cycles in such a system one ends up with an equilibrium photon gas characterized by the temperature of the dye solution, and by a chemical potential that depends on the population of the excited and fundamental electronic molecular levels. The chemical potential is therefore controlled by the external pumping, independently of temperature [1]. As it has been largely studied in the case of random lasers, multiple scattering of light in a disordered medium is an apparently simple and efficient way to promote absorption-emission cycles by an ensemble of emitters immersed within the medium thus mimicking the effect of a cavity.

In this talk we will show the first demonstration of photon thermalization in a scattering medium interacting with Rhodamine molecules [2], in a regime which is far from the one of random lasers [3] that require both multiple scattering and large pump power. We will show a dramatic change of the Rhodamine emission spectrum driven by both scattering and fluorophores' absorption and emission cycles. Such modification strongly depends on the density of scatterers and fluorophores. A delicate balance between these phenomena leads to photon thermalization in which the emission spectrum follows a Bose-Einstein distribution with a non-vanishing chemical potential. We demonstrate that the number of emitted photons is driven by the chemical potential, set by the external pumping, and that the spectrum is thermalized at the temperature of the sample.

This work opens interesting outlooks for the study of thermalization and of Bose-Einstein condensation in simple disordered scattering media and its difference from the random laser regime.

References:

- [1] J. Klaers et al., Nat. Phys. 6, 512 (2010)
- [2] L. Soncin et al., in preparation (2025)
- [3] H. Cao, Opt. Photon. News, 16, 24 (2005)

Club des partenaires

Stratégies de détection et de localisation d'impulsions électromagnétiques de forte puissance

M. Schutz¹
¹ : INOVEOS,
 mschutz@inoveos.com

Résumé

Les IEMI (Interférences ElectroMagnétiques Intentionnelles) sont reliées à des attaques EM. Elles visent les systèmes électroniques critiques. Pour localiser précisément la source émettrice, une méthode de mesure TDoA (Time Difference of Arrival) est étudiée en utilisant le système industriel DAEM (Détecteur d'Activités ElectroMagnétique), qui permet la détection et la caractérisation de ces signaux impulsions de forte puissance. Cette mesure repose sur la synchronisation des déclenchements entre plusieurs DAEM. Un algorithme est proposé pour estimer la direction et la position de la source. Un simulateur a été développé pour évaluer la précision du système. L'approche proposée permet d'envisager une localisation efficace de signaux impulsions brefs et puissants.

1. Introduction

Les IEMI sont assimilables à un évènement technique ou panne quelconque. Les cibles sont tous systèmes électroniques pouvant être dédiés à la gestion électrique, la surveillance ou au stockage de données. Les dispositifs d'agression rayonnants sont composés d'une source RF de forte puissance couplée à une antenne. Ces systèmes peuvent être dérivés de systèmes électroniques RF de forte puissance provenant du marché [1]. Des travaux communs entre INOVEOS et le CEA ont donné naissance à un système de détection et de caractérisation DAEM (Détecteur d'Activités Electro-Magnétique) [2], dont sa version industrielle est illustrée en Figure 1. Il s'agit d'un système intégré pour la détection et la caractérisation des IEMI, notamment des formes d'onde impulsions. Toutefois, le dispositif seul ne permet pas la localisation de la source. L'objectif de ces travaux est la mise en œuvre de stratégies de localisation d'impulsions EM à partir d'une mise en réseau de ce dispositif. Une méthode de mesure, un algorithme de traitement et un simulateur sont proposés pour l'étude et le développement de la nouvelle fonctionnalité.

2. Localisation de sources RF

La méthode de localisation TDoA (Time Difference of Arrival) peut être réalisée par un seul capteur (avec une fréquence d'échantillonnage suffisante vis-à-vis de l'espacement entre les antennes) ou par un réseau de capteurs suffisamment espacés (triangulation). Cette méthode consiste à mesurer les différences entre les temps d'arrivée du signal de l'émetteur, qui est non-coopératif, vers les récepteurs qui ont un emplacement connu. Cette différence de temps et de distance permet le tracé d'une hyperbole. Le point d'intersection des différentes hyperboles donne une estimation de la position de la source [3]. Pour le calcul de ces temps, un partage précis de la base de temps est nécessaire, comme c'est le cas du GPS [4]. De plus, les TDoA sont sensibles et peuvent être dégradés par un faible SNR, des multi-trajets ou des masquages [5]. Des systèmes industriels permettent la localisation d'émetteurs comme c'est le cas des « DF Antenna » (Rohde & Schwarz) R&SADD307, R&SADD507 ou le « DF & Spectrum Monitoring System » RFeye Array 300 (CRFS). Toutefois, la largeur de bande instantanée (IBW) de ces systèmes s'étend de quelques 10 MHz à quelques 100 MHz, ce qui rend difficile le traitement de signaux impulsions très courts (<1ns) et furtifs (mono-pulse) de surcroît. Par ailleurs, les équipements proposés sur le marché ne sont pas conçus pour supporter des champs intenses (>10kV/m).



Figure 1. DAEM en version industrielle (INOVEOS).

Le DAEM est conçu pour la détection et la caractérisation d'un rayonnement électromagnétique intentionnel d'intensité variable. Le système permet une mesure des paramètres (niveau, durée moyenne, fréquence de répétition, sous-bande) de l'impulsion EM sur la bande [50-10000] MHz et supporte des champs > 10 kV/m. Le DAEM est équipé d'un lien en fibre optique permettant la fourniture des données de détection à une centrale ou directement sur un PC. Lorsque plusieurs DAEM sont installés sur site, la zone où se situe la source est déterminée par sectorisation et/ou via une analyse des niveaux de puissance. Toutefois, la performance de DF (Direction Finding) est limitée par cette simple analyse des niveaux de champs sur chaque DAEM sollicités.

Pour appliquer la méthode de localisation TDoA et bénéficier d'une estimation plus précise de la direction et de la localisation de la source, les liens en fibre optique existants sur le DAEM, servant à transmettre les données de détection, peuvent être exploités. En effet, en modifiant l'architecture du DAEM afin de générer un signal de déclenchement analogique (trigger), il devient possible, via une centrale ou un module d'acquisition, d'exploiter ces signaux de déclenchement pour calculer les TDoA associés. Cette mesure peut alors être réalisée via une analyse synchrone [6]. Il s'agit de déterminer la durée temporelle d'une séquence ΔT_i (temps écoulé depuis le premier DAEM déclenché) en comptant le nombre de période d'un signal d'horloge de référence sur la durée de cette séquence selon l'équation (1).

$$\Delta T_i = \frac{N}{f_{CLK}} \quad (1)$$

Avec N le nombre de front comptabilisés de l'horloge de référence et f_{CLK} la fréquence de d'horloge (Hz). Le principe de mesure peut être facilement implémentée sur un FPGA (Field-Programmable Gate Array), à partir des signaux de déclenchement (trigger).

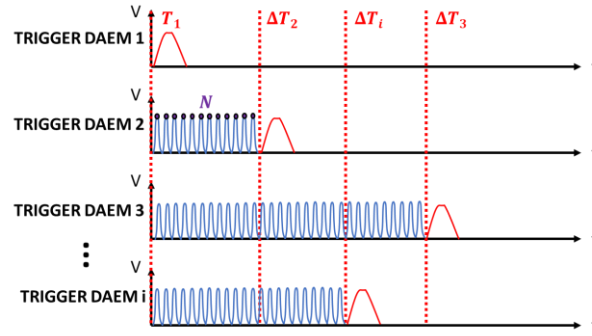


Figure 2. Principe de l'analyse synchrone pour la détermination des TDoA.

Les signaux de détection fournis par le DAEM offrent une information de temps (TDoA) à partir d'un déclenchement (trigger) de chaque détecteur. Pour déterminer la direction de la source et estimer sa position, un algorithme adapté à un positionnement et un nombre de DAEM arbitraire doit être mis en œuvre. Pour cela, un dérivé de l'algorithme de back-projection dans le domaine temporel est proposé. Les étapes de traitement de l'algorithme sont détaillées ci-dessous :

1. Création d'une matrice de positions spatiales 2D (pixels) ou 3D (voxels).
2. Pour chaque pixel ou voxel, calculer le score e selon l'équation (2).

$$e(x, y, z) = \frac{\sum_{i=1}^N (T\Delta i - T_{\Delta(x,y,z)i})}{N} \quad (2)$$

Avec x, y, z la position du pixel ou voxel, $T\Delta i$ le Δ temps mesuré donné par le DAEM $N^\circ i$, si premier arrivé $T\Delta i = 0$. N le nombre de DAEM et $T_{\Delta(x,y,z)i}$ le Δ temps théorique associé au pixel ou voxel sur le DAEM $N^\circ i$.

3. Effectuer une régression linéaire 2D ou 3D, ce qui correspond à la recherche de la position moyenne des pixels ou voxels ayant le score le plus élevé.
4. Détermination de l'angle d'arrivée et estimation de position x, y, z de la source.

3. Analyse en simulation

Pour optimiser les paramètres du système, tels que la fréquence d'horloge pour la mesure des TDoA, la précision de mesure et le placement des DAEM sur le site à protéger, un simulateur a été développé sous MATLAB. Le simulateur permet, à partir d'une configuration de la scène et des paramètres du circuit de mesure (signal RF, fréquence de l'horloge de référence sur le FPGA, niveau de Jitter), d'une part, d'obtenir les TDoA sur chaque DAEM en effectuant une simulation des ToA (Time of Arrival) à partir de tracés de rayons (ray-tracing) et d'autre part, d'appliquer l'algorithme proposé et d'en extraire les imageries et précisions de mesure associées. Dans la configuration présentée en Figure 4, 8 DAEM sont placés arbitrairement sur un espace 2D. La source est positionnée aux coordonnées (0m, 50m). Une fréquence d'horloge élevée permet une résolution spatiale plus fine pour une géométrie de placement fixée. Toutefois, un compromis doit être trouvé tenant compte du coût et la forte complexité des FPGA pour des fréquences de fonctionnement supérieures à 200MHz.

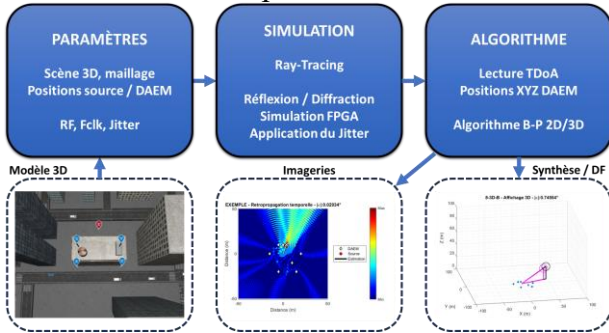


Figure 3. Architecture du simulateur TDoA DAEM.

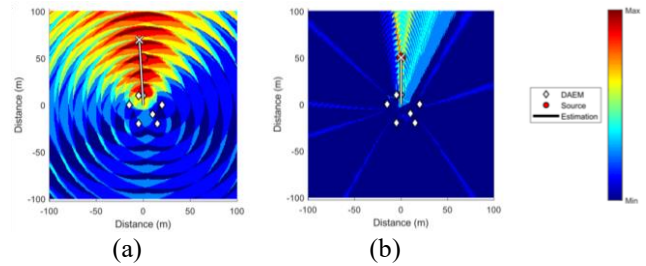


Figure 4. Exemple de l'influence de la fréquence d'horloge de référence (FPGA) sur la précision de mesure ; $f_{CLK} = 20 \text{ MHz}$ (a) $f_{CLK} = 500\text{MHz}$ (b).

Une analyse de l'effet de Jitter sur la précision a été menée. Il s'agit de dégrader la précision en ajoutant des erreurs sur le nombre de fronts d'horloge de référence comptabilisés dans le traitement du FPGA (Equation 1.). La géométrie de la scène présentée en Figure 5. est identique à celle en Figure 4. Les écarts temporels, notamment ceux induits par le Jitter et les temps de propagation dans les circuits analogiques, introduisent des perturbations notables dans les reconstructions de l'imagerie. Ils se manifestent par des déviations des hyperboles théoriques et provoquent une perte de focalisation spatiale. Ainsi, la caractérisation fine du comportement temporel des sous-systèmes analogiques permettra le choix des composants analogiques adaptés et l'optimisation du système complet.

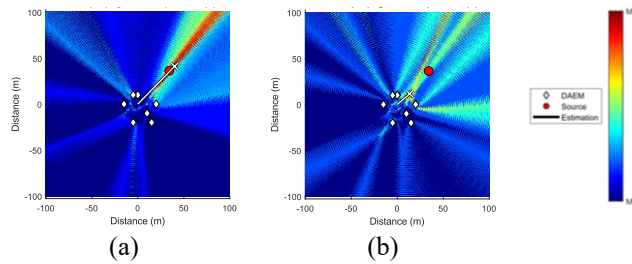


Figure 5. Exemple de l'influence du Jitter sur la précision de mesure de DF ; Jitter ≤ 1 période f_{CLK} (a) Jitter de 3 périodes f_{CLK} (b).

La configuration géométrique des DAEM constitue un facteur critique influençant directement la précision de l'estimation de position via la méthode TDoA. Afin de modéliser avec précision la propagation des ondes électromagnétiques dans un environnement donné, notamment en milieu urbain complexe, une approche par tracé de rayons (ray-tracing) a été implémentée dans le simulateur. Cette méthode permet de

prendre en compte les réflexions, diffractions, et atténuations et permet de générer des temps d'arrivée réalistes sur chaque DAEM. Les résultats obtenus soulignent la nécessité d'un placement optimisé des DAEM, visant à maximiser la diversité spatiale des TDoA et à minimiser les effets de masquage et les redondances géométriques.

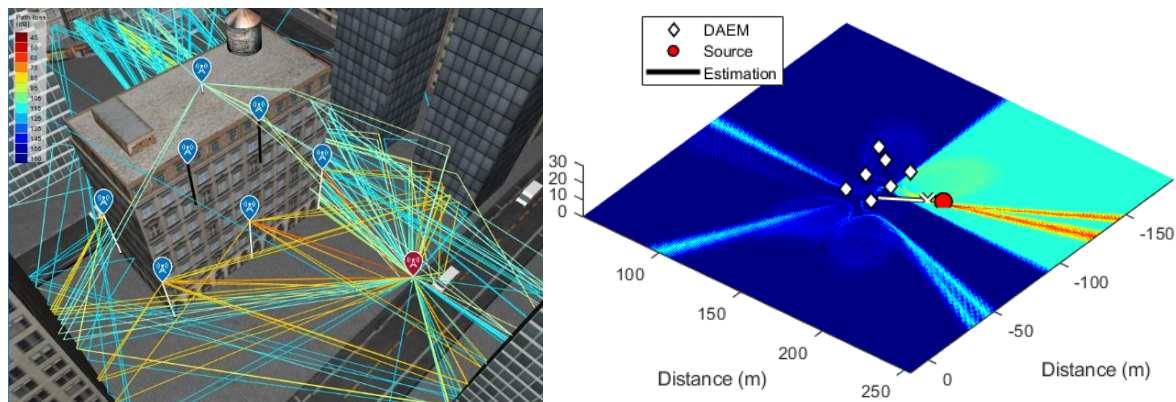


Figure 6. Tracé de rayons pour la simulation des TDoA, site critique en zone urbaine représentatif, modélisé en 3D.

4. Conclusion

Les IEMI représentent une menace croissante pour les systèmes électroniques critiques. Face à cette problématique, l'approche développée combine l'usage du système industriel DAEM à une méthode de localisation TDoA, apportant une nouvelle solution pour détecter et localiser les sources RF de puissance. L'architecture proposée repose sur une mesure de TDoA des signaux de déclenchement de plusieurs DAEM, réalisée via un traitement numérique implémentable sur FPGA. L'algorithme de localisation développé permet d'estimer la direction et la position de la source à partir d'un réseau de capteurs, même pour des configurations non uniformes. Un simulateur a été conçu pour évaluer les performances du système en fonction de plusieurs paramètres critiques tels que la fréquence d'horloge de référence, le Jitter ou la géométrie du déploiement. Les résultats obtenus montrent la faisabilité d'une localisation, tout en soulignant l'impact important des contraintes matérielles.

Ces travaux constituent ainsi une avancée vers la mise en œuvre opérationnelle de dispositifs de localisation d'IEMI dans des environnements complexes, avec des perspectives d'amélioration portant notamment sur l'optimisation de l'architecture matérielle et la réalisation de prototypes pour une validation sur site.

5. Bibliographie

- [1] F. Sabath, "What can be learned from documented Intentional Electromagnetic Interference (IEMI) attacks?," 2011 XXXth URSI GASS, Istanbul, Turkey, 2011, pp. 1-4.
- [2] N. Ribière-Tharaud et al. , « Affordable IEMI detection system for critical infrastructure protection », présenté à AE Symposium 2018 (AMEREM 2018), Santa Barbara California, août 2018.
- [3] S. Gazovova et al. , « Experimental Results for Indoor Position Estimation with TDOA Method », in 2022 New Trends in Signal Processing (NTSP), Liptovský Mikuláš, Slovakia: IEEE, oct. 2022, p. 1-5.
- [4] J. Yoon et al. , « A TDoA-based localization using precise time-synchronization », 2012.
- [5] C. Hannotier et al. , « A geometry-based algorithm for TDoA-based localization in the presence of outliers », in 2023 IEEE WCNC, Glasgow, United Kingdom: IEEE, mars 2023, p. 1-6.
- [6] Z. Wenquan et al. , « Design of High Precision Frequency Meter Based on SOPC », in 2011 First International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control, Beijing, China: IEEE, oct. 2011, p. 566-569.

Capteur de champ électrique basé sur des cristaux photoniques sur couches minces de niobate de lithium

J.-D. Fayssaud^{1,2}, A. Zinaoui², M. A. Suarez², L. Robert², S. Queste², R. Salut²,
 M.-P. Bernal², F. Baida², B. Rousseaux², D. Gapillout¹, N. Courjal²

¹ : CEA, DAM, Gramat, F-46500 Gramat, France

² : Université Marie et Louis Pasteur, CNRS, FEMTO-ST institute, F-25000 Besançon, France

Email : jean.fayssaud@femto-st.fr

Résumé

Nous montrons des capteurs électro-optiques à base de LiNbO₃, intégrés sur guide d'onde ou sous forme de cristaux photoniques ultraminiatures, permettant la détection large bande et peu intrusive des champs électriques impulsionnels avec des performances adaptées à des environnements extrêmes.

1. Introduction

La caractérisation des signaux électromagnétiques impulsionnels constitue un enjeu majeur dans de nombreux domaines, allant de la physique des plasmas à haute tension aux applications militaires mettant en œuvre des impulsions de forte puissance. Elle nécessite des capteurs combinant trois propriétés essentielles : large bande passante, immunité intrinsèque aux perturbations électromagnétiques et faible intrusivité vis-à-vis du champ mesuré. Dans ce contexte, les capteurs électro-optiques (EO) se distinguent par leur architecture entièrement diélectrique, qui leur confère une robustesse particulière dans des environnements extrêmes. Le niobate de lithium (LiNbO₃) est privilégié en raison de ses forts coefficients électro-optiques [1-3]. Toutefois, ces capteurs doivent encore relever certains défis pour concilier robustesse, sensibilité et compacité, et les démonstrations de mesures impulsionnelles par des sondes fibrées restent rares. Pour répondre à ces contraintes, deux approches complémentaires sont explorées. La première repose sur un capteur intégré sur guide d'onde, conçu pour offrir une mesure stable et indépendante de la température. La seconde met en œuvre un capteur ultraminiature à cristaux photoniques, dont la conception favorise une réponse large bande adaptée à la détection de signaux impulsionnels rapides. Ces développements ouvrent la voie à une instrumentation capable de répondre aux exigences croissantes liées à l'étude et au contrôle des phénomènes électromagnétiques transitoires.

2. Sondes déployées

La Fig. 1 illustre les deux configurations déployées. La première (Fig. 1a) est un guide d'onde LiNbO₃ fonctionnant comme modulateur de polarisation : en présence d'un champ électrique, la biréfringence est modifiée selon l'équation 1 :

$$\Delta n = -\frac{1}{2} \cdot n_o^3 \cdot r_{22} \cdot E_y \quad (1)$$

Où $n_o=2.21$ est l'indice ordinaire, $r_{22}=4.7$ pm/V est le coefficient électro-optique en jeu pour une longueur d'onde de $1.55 \mu\text{m}$, et E_y le champ électrique appliqué. Ce changement de biréfringence induit un changement de l'état de polarisation, qui se caractérise par une variation d'intensité en sortie de la fibre polarisante. L'orientation du guide suivant l'axe Z du cristal permet de réduire au maximum la biréfringence intrinsèque (en l'absence de champ électrique), assurant ainsi une stabilité du point de fonctionnement vis-à-vis de la température, sans recours à des boucles de rétroaction. Nous montrerons les premiers résultats de détections de champs impulsionnels pour cette configuration.

La deuxième représentée en Fig. 1b est un cristal photonique inscrit sur membrane fine de LNOI (Lithium Niobate On Insulator), dont le principe de fonctionnement repose cette fois sur une résonance Fano dont la position spectrale dépend de l'indice de réfraction. La polarisation est orientée suivant l'axe extraordinaire du cristal pour bénéficier de la faible dépendance en fréquence du coefficient électro-optique r_{33} . Cette configuration, plus sensible aux variations de température, favorise en revanche un fonctionnement large bande (estimée à 200 GHz) et une résolution longitudinale record de moins de 1 μm . Nous montrerons les paramètres clés régissant la sensibilité de ces capteurs, ainsi que leurs réponses fréquentielles.

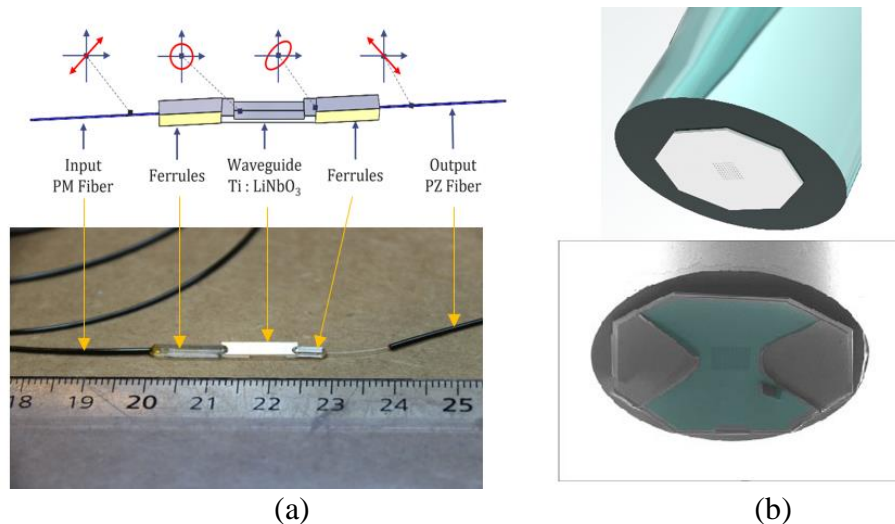


Figure 1. Sondes LiNbO_3 de détection des champs électriques. (a) Guide électro-optique, modulateur de polarisation : haut, schéma de principe indiquant les blocs fonctionnels, bas : photographie. (b) Haut : Vue schématique de la sonde fibrée à cristal photonique. Bas : image au Microscope à Balayage électronique

4. Conclusion

Les capteurs LiNbO_3 représentent une solution prometteuse de détection et mesure des champs électriques impulsionnels. Les solutions déployées, outre leurs performances électro-optiques déjà démontrées, offrent l'avantage de s'appuyer sur des technologies exclusivement locales. Les performances actuelles dépendent encore de la chaîne de mesure, mais montrent déjà tout leur intérêt pour le déploiement de solutions passives, autonomes et faiblement intrusives.

5. Remerciements

Ce travail est financé par le CEA Gramat, EQUIPEX + SMARTLIGHT platform (ANR-21-ESRE-0040), NANOFUTUR (ANR-21-ESRE-0012) et EIPHI Graduate School (ANR-17-EURE-0002). Il a été réalisé en s'appuyant sur le réseau Renatech, les travaux technologiques sont faits à la centrale technologique MIMENTO, et le projet a reçu le soutien de la Région Bourgogne Franche-Comté.

6. Bibliographie

- [1] D. Lee, et al, Integrated electrooptic sensor for intense electromagnetic pulse measurements. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 72, 1-8, 2023
- [2] Z. Zhang, et al, "Fano-resonant electric field sensor based on the thin film lithium niobate micro-ring with enhanced sensitivity," Opt. Express 33, 25210-25220, 2025
- [3] F. Behague, et al "Minimally invasive optical sensors for microwave-electric-field exposure measurements," J. Opt. Microsyst. 1(2) 020902, 2021

Caractérisation d'un démonstrateur AESA DBF en bande L sur signal modulé

C. Deville⁽¹⁾, L. Stubbe⁽¹⁾, C. Melle⁽¹⁾, B. Lesur⁽¹⁾, V. Desormeau⁽¹⁾, R. Huynh⁽¹⁾, V. Garcia⁽²⁾, G. Chavanas⁽²⁾

¹ : Safran Data Systems, France,

² : CNES, France

christophe.melle@safrangroup.com

Résumé

De plus en plus d'activités de stations au sol sont sollicitées pour communiquer avec plusieurs cibles simultanément, notamment avec des satellites défilant de constellations MEO et LEO. Les technologies AESA basées sur des architectures analogiques ou hybrides (formation de faisceau analogique et numérique) démontrent de bonnes capacités de formation de faisceaux avec précision, flexibilité et rapidité. Cependant, ces types d'architectures sont adaptées pour un nombre de faisceaux simultanés limités, du fait de la complexité d'intégration de plusieurs réseaux de formation de faisceaux (BFN). C'est pourquoi l'architecture de formation de faisceaux purement numériques (DBF) est choisie. Cette technologie est ainsi illustrée par un démonstrateur en bande L. Ce démonstrateur est une architecture dotée d'une fonction logicielle basée sur le code VHSIC Hardware Description Language (VHDL) et peut former un minimum de 4 faisceaux simultanés. La caractérisation du démonstrateur se déroule en deux étapes. D'abord avec la caractérisation des faisceaux statiques, et de façon dynamique dans une chambre anéchoïque. Dans un deuxième temps, à l'aide d'un banc de test incluant un modem. Ceci afin de qualifier les performances de cette architecture DBF sur des signaux modulés en laboratoire, et en conditions opérationnelles.

Mots clés — BFN, Digital beamforming, RFSoc, AESA, caractérisation, signal modulé, QPSK

1. Introduction

Le contexte des cibles multi-satellites constitue un enjeu important sur l'évolution des équipements des stations sol. Les stations au sol actuelles sont équipées d'antennes paraboliques, qui ont de bonnes capacités de positionnement mécanique et de suivi de satellites en orbite géostationnaire, et en orbites basse et moyenne dans des cas particuliers. Cependant, elles ne sont pas adaptées aux multicibles proposées dans les constellations LEO/MEO, du fait du principe d'architecture. Ainsi, l'architecture AESA permet à la fois d'éliminer les problèmes de mouvement mécanique et de latence grâce au contrôle individuel de chaque élément rayonnant du réseau d'antennes. Ceci est possible grâce à un contrôle fin en amplitude et phase des chaînes actives connectées respectivement à chacun des éléments rayonnants.

La technologie AESA comprend différentes architectures et des compromis : architectures analogiques, hybrides et numériques. Les architectures analogiques et hybrides ont des limites pour former plusieurs faisceaux et pour atteindre les performances nécessaires dans le suivi de plusieurs cibles. En effet, ces architectures nécessitent un BFN physique pour chaque faisceau formé, et donc l'utilisation d'un grand nombre de composants, entraînant un coût important, des problèmes d'intégration et de dissipation thermique. Par conséquent, l'architecture DBF constitue une bonne opportunité de combiner les performances de la technologie AESA en termes de précision, de flexibilité et de rapidité, avec des capacités de calcul pour réaliser numériquement la formation de faisceaux multiples et quasi-simultanée. De plus, de nombreuses autres applications sont possibles grâce à ce type de station sol DBF telles que la télémesure sur des satellites en très basse orbite terrestre, la surveillance spatiale, la détection et la localisation passives.

Dans cet article, nous décrivons une architecture DBF d'un démonstrateur en bande L et toutes ses performances (Section II). Dans la section III, nous présentons la caractérisation du démonstrateur pour valider son fonctionnement nominal. Dans la section IV, nous présentons la caractérisation du

démonstrateur avec un exemple de signaux modulés (QPSK).

2. Définition du démonstrateur AESA DBF bande L

Le démonstrateur AESA DBF (Fig. 1) comporte un panneau de 16 éléments rayonnants et deux cartes de démonstration RFSoc, lesquelles sont nécessaires pour numériser les canaux RF. L'architecture implémentée sur ces cartes est basée sur du VHDL. La définition du code VHDL et le calibrage de toutes les chaînes constituent la partie la plus importante de ce travail.

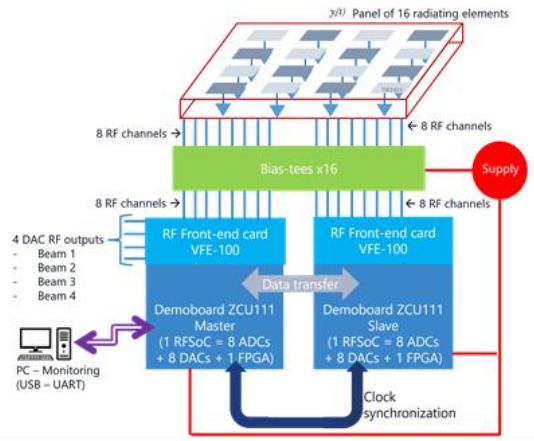


Figure 1. Géométrie de l'antenne

3. Caractérisation de la formation de faisceaux

La caractérisation des diagrammes de rayonnement en bande L est faite à l'aide d'un système de mesure champ proche sphérique en chambre anéchoïque. Ces mesures sont comparées aux diagrammes de rayonnement calculés par un logiciel de simulation afin de valider la formation de faisceaux statiques. La caractérisation est complétée par une expérimentation reproduisant le déplacement d'une cible. Ceci dans le but de valider la capacité du démonstrateur à traiter des faisceaux en mode dynamique.

4. Caractérisation avec un signal modulé

Une description est faite du banc de test utilisé pour caractériser la capacité de l'architecture DBF à traiter les signaux modulés (exemple de modulation QPSK). Des mesures sont réalisées à l'aide d'un modem Safran. Les performances clés sont analysées : constellation, rapport E_b/N_0 et bilan de liaison pour différents scénarios. Enfin à noter que le démonstrateur est prévu pour être testé sur des satellites GNSS.

5. Remerciements

Les auteurs remercient le Centre National d'Etude Spatiale qui a permis et contribué à l'étude et la réalisation de ce démonstrateur chez Safran Data Systems.

6. Bibliographie

- [1] H. Steyskal, "Digital beamforming antennas - An introduction", Microwave Journal, 1986, 30. 107.
- [2] S. Pulipati et al., "A Direct-Conversion Digital Beamforming Array Receiver with 800 MHz Channel Bandwidth at 28 GHz using Xilinx RF SoC," 2019 IEEE International Conference on Microwaves, Antennas, Communications and Electronic Systems (COMCAS), Tel-Aviv, Israel, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/COMCAS44984.2019.8958039.

Session 'Codes libres'

PyMoosh : librairie Python Open-Source pour la simulation optique de systèmes multicouches

D. Langevin¹, P. Bennet¹, A. Moreau²,

¹ : Aix Marseille Univ, CNRS, Université de Toulon, IM2NP, UMR 7334, F-13397 Marseille, France,

² : Université Clermont Auvergne, CNRS, Institut Pascal, F-63000 Clermont-Ferrand, France
denis.langevin@univ-amu.fr

Résumé

Nous présentons une bibliothèque Python conçue pour faciliter les études et la conception de structures photoniques.

Cette bibliothèque, PyMoosh, permet de calculer les caractéristiques optiques de structures multicouches, ainsi qu'optimiser des empilements pour obtenir des fonctions photoniques spécifiques. Il s'agit d'un outil polyvalent et facile à prendre en main, qui peut s'utiliser aussi bien pour faire de la recherche que pour illustrer des concepts dans un cadre pédagogique.

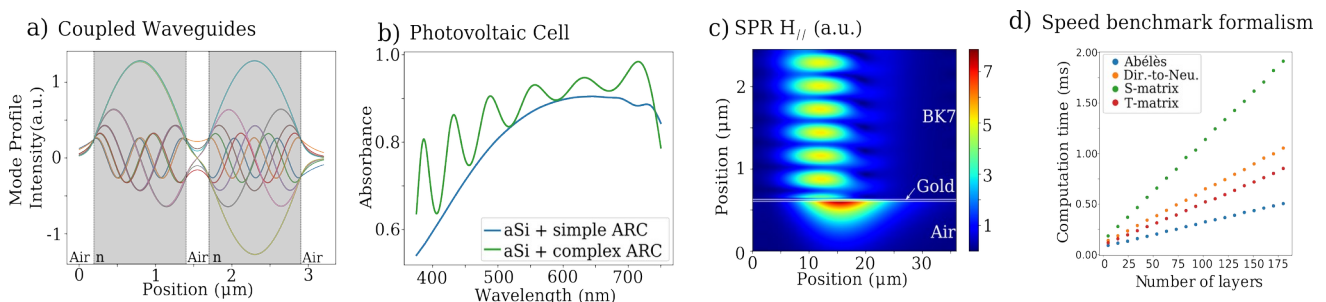
1. PyMoosh

PyMoosh, pour "Python-based Multilayer Optics Optimization and Simulation Hub", est une bibliothèque polyvalente codée en Python qui permet d'étudier n'importe quelle propriété optique et photonique des structures multicouches[1]. PyMoosh permet, entre autres, de trouver des modes guidés et d'afficher leur profil (Fig. 1a); de tracer des spectres de réflexion, de transmission ou d'absorption (Fig. 1b); ou de représenter des cartes de champs (Fig. 1c) ; grâce à des fonctions dédiées. Un algorithme d'optimisation, Differential Evolution, est également inclus dans PyMoosh.

Différents formalismes de calcul de propriétés optiques (notamment les matrices de diffusion S et les matrices d'Abélès) sont intégrés pour laisser libre choix à l'utilisateur d'utiliser celui qu'il trouve le plus pertinent. La méthode par défaut implémentée dans PyMoosh est la méthode des matrices S car c'est celle qui s'est montrée la moins sujette aux instabilités numériques. Elle est cependant la plus coûteuse en temps de calcul, il peut donc être pertinent de se tourner vers une autre méthode selon les structures étudiées.

Dans des travaux récents[2], nous réalisons une comparaison complète de ces méthodes, impliquant leur coût en temps de calcul (Fig. 1d) et leur stabilité numérique. Nous présentons les fonctionnalités de PyMoosh et nous fournissons des tutoriels, sous la forme de Jupyter Notebook, qui illustrent l'utilisation de PyMoosh à travers différentes applications telles que la résonance d'un plasmon de surface, l'optimisation d'une structure photovoltaïque, la représentation de modes guidés, etc. Ces Notebooks sont accessibles, faciles à utiliser ainsi qu'à adapter à d'autres usages.

Depuis les dernières présentations de PyMoosh, de nouvelles fonctionnalités ont été rajoutées, dont la modélisation des effets non-locaux, ou spatialement dispersifs. Cette modélisation consiste en la prise en compte de la répulsion entre les électrons dans les matériaux dont la densité électronique est très élevée, tels que les métaux ou les semi-conducteurs très dopés.



2. Tutoriels

Souhaitant que PyMoosh soit utilisé par la communauté le plus facilement possible, nous avons écrit un tutoriel pour expliquer son fonctionnement et nous mettons à dispositions des Jupyter Notebook qui permettent de prendre en main le logiciel[2]. De même, l'optimisation globale étant un sujet complexe, nous avons rédigé un tutoriel sur son utilisation en photonique, que nous avons également accompagné de Jupyter Notebook illustrant comment utiliser PyMoosh pour effectuer des optimisations de structures photoniques[3].

Toujours dans cette volonté pédagogique, l'idée est de présenter un « poster numérique », notamment à l'aide des Jupyter Notebooks permettant des démonstrations en direct des possibilités de PyMoosh.

3. Conclusion

Dans cette contribution faisant suite au webinaire « Codes Libres » du GT1, nous souhaitons montrer à un public toujours plus grand comment utiliser la librairie PyMoosh, aussi bien pour des utilisations pédagogiques que pour des applications de recherche.

4. Bibliographie

- [1] A. Moreau, « PyMoosh », <https://pypi.org/project/PyMoosh/>
- [2] Langevin, D. et al., « PyMoosh : a comprehensive numerical toolkit for computing the optical properties of multilayered structures », <https://arxiv.org/abs/2309.00654v1>
- [3] Bennet, P. et al., « An illustrated tutorial on global optimization in nanophotonics », <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.09760>

Résolution de problèmes d'ondes avec FreeFem++ (éléments finis)V. Laude¹

¹ : Université Marie et Louis Pasteur, SUPMICROTECH, CNRS, institut FEMTO-ST, 25000
Besançon
vincent.laude@femto-st.fr

Résumé

Cet exposé est dédié à la résolution de problèmes de propagation d'ondes à l'aide du logiciel FreeFem++ (abrégé ff++). Il s'agit d'un logiciel open-source^{1,2} dont la syntaxe est similaire à celle du langage C++ qui fournit la solution d'équations aux dérivées partielles – dont l'équation d'onde fait partie – par l'écriture de scripts relativement compacts. ff++ inclut un ensemble de fonctions de haut niveau pour décrire l'équation considérée ainsi que le domaine de calcul. Il appelle différents solvers suivant le problème considéré, au choix de l'utilisateur, et offre un accès complet aux matrices et solutions générées.

Dans cet exposé, je considérerai différents problèmes de propagation d'ondes, en insistant sur le cas des ondes acoustiques scalaires, pour simplifier le propos – mais le langage permet aisément de traiter le cas des ondes vectorielles, comme les ondes élastiques dans les solides ou les équations de Maxwell. Le cas des ondes harmoniques suivant une équation de type Helmholtz, de fréquence donnée, sera privilégié. Les problèmes considérés incluent la propagation en espace libre, grâce à l'implémentation de *perfectly matched layers* (PML) pour approcher le rayonnement, de problèmes de guidage (calcul de la relation de dispersion) et de milieux périodiques (cristaux artificiels). Le calcul des modes normaux – ou modes propres – ainsi que des modes quasi-normaux (QNM) sera exposé.

FreeFem++ résout les équations aux dérivées partielles directement à partir de leur forme faible, qui est heureusement d'obtention assez aisée pour les équations d'onde. De nombreux exemples concernant les cristaux phononiques (ondes acoustiques et élastiques) sont disponibles sur ma page personnelle³ en accompagnement d'un livre dédié au sujet⁴. Le langage permet assez aisément de résoudre des cas où plusieurs physiques sont couplées, comme la piézoélectricité ou le couplage acoustique-élastique (sous cas du couplage fluide-structure pour les ondes).

Bibliographie

- [1] <https://freefem.org/>
- [2] Hecht, F. (2012). New development in FreeFem++. *J. Numer. Math.*, 20(3-4), 251-266, 2012.
- [3] <https://members.femto-st.fr/vincent-laude/freefem-scripts-numerical-simulation-phononic-crystals>
- [4] Laude V, *Phononic crystals: artificial crystals for sonic, acoustic and elastic waves, second edition*, De Gruyter, Berlin, 2020.

Software tool for modelling photonic nanostructures SimPhotonicsFMM Matlab Toolbox

Mondher Besbes, Henri Benisty and Christophe Sauvan

Université Paris-Saclay, Institut d'Optique Graduate School, CNRS, Laboratoire Charles Fabry, 91127 Palaiseau, France

mondher.besbes@institutoptique.fr

Software tools dedicated to the simulation of photonic micro- and nanostructures in periodic arrays, whether open-source or proprietary, meet a wide range of needs, both in the academic world and in industry. The choice between these tools generally depends on several criteria, including speed of calculation and ease of use. These two criteria are at the heart of the development of the SimPhotonicsFMM toolbox, which is based on the **F**ourier **M**odal **M**ethod (also known as Rigorous Coupled Wave Analysis) [1,2]. SimPhotonicsFMM is a Matlab toolbox useful for simulating micro- and nanophotonic structures. It is based on the Fourier modal method and can be used to model multilayer structures, metamaterials, 1D and 2D periodic metasurfaces [3].

To generate nanoparticle shapes, SimPhotonicsFMM uses the Gielis formula [4], which can be used to describe shapes as varied as they are complex, with only six parameters. This reduces the number of geometric parameters to be considered when optimizing or training a deep learning neural network. In fact, it is possible to generate varied and complex shapes without having to discretize the network cell, in which a potentially different refractive index is associated with each pixel. This formula describes a complex shape in polar coordinates using 6 parameters: a, b, m, n_1, n_2, n_3 . Figure 1 shows four examples of different shapes and the associated parameter values.

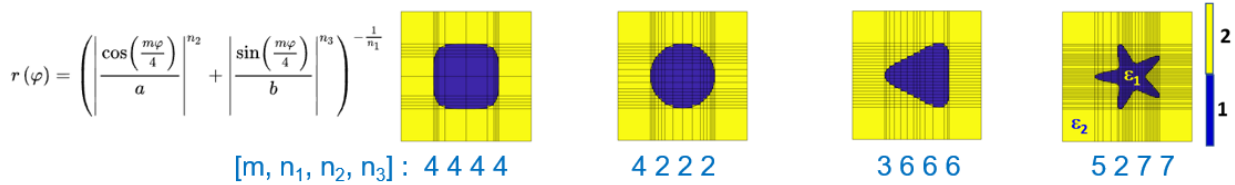


Figure 1. Example of structures and associated parameters used in the Gielis super-formula. Geometric discretization is used to assign physical properties to each cell, making it easy to use Fourier series factorization rules [2].

To reduce CPU time, we have implemented a numerically efficient combination of FMM and the differential method with **F**inite **D**ifferences without loss of accuracy [5]. The gain in CPU time compared to pure FMM exceeds one order of magnitude for large numbers of Fourier harmonics. Figure 2 shows the case of a metal-based metasurface for biophotonic applications composed of a 2D periodic array of gold nanocylinders on top of a thin gold film deposited on a glass substrate. Compared to pure FMM calculations, the mixed Fourier Finite Difference formalism is faster especially for large numbers of Fourier harmonics.

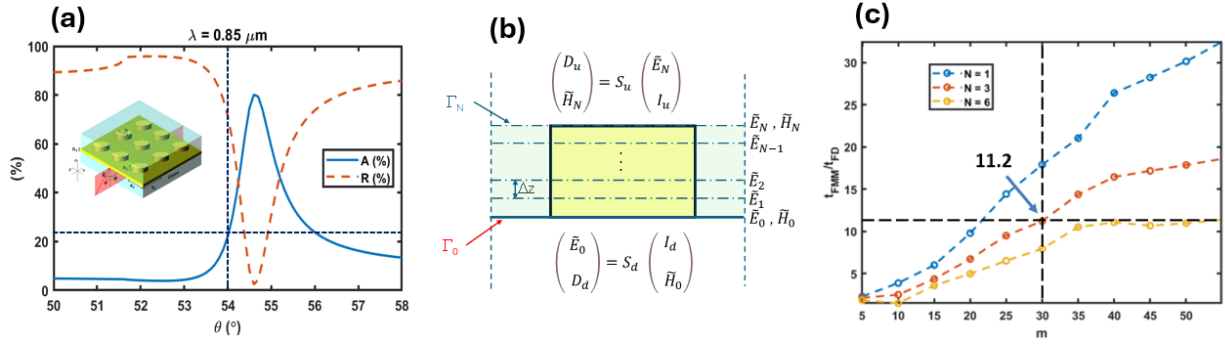


Figure 2. (a) Absorption and reflectivity versus incidence angle of a biosensor with a patterned gold layer (inset). (b) The photonic structure is modeled with a combination FMM + Finite Difference, with N the number of subdivisions. (c) Gain in CPU time (with respect to pure FMM) at the angle of $\theta = 54^\circ$ vs the number m of Fourier harmonics for different numbers of subdivisions $N=1, 3, 6$.

Thanks to its advanced features, SimPhotonicsFMM is a valuable resource for researchers and engineers working in the field of micro/nanophotonics. The code's features include calculation of the reflection, transmission, and absorption of incident light (whatever its polarization), support for dispersive materials, reduced calculation time with symmetry with respect to one plane, accelerated calculation of a periodic stack of thin layers (Bragg mirror), intuitive visualization of the field, parallel calculation, etc.

References

- [1] M.G. Moharam, E.B. Grann, D.A. Pommet and T.K. Gaylord, "Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings", J. Opt. Soc. Am. A 12, 1068 (1995).
- [2] L. Li, "New formulation of the Fourier modal method for crossed surface-relief gratings", J. Opt. Soc. Am. A 14, 2758 (1997).
- [3] <https://github.com/SimPhotonicsFMM/Sources>
- [4] J. Gielis, "A generic geometric transformation that unifies a wide range of natural and abstract shapes", American Journal of Botany 90, 333 (2003).
- [5] M. Besbes, Y. Fehri, H. Benisty and C. Sauvan, "Fourier Finite-Difference method and Proper Orthogonal Decomposition for quick spectral study of 2D periodic photonic structures", submitted to JOSA A

Practical metasurfaces applications in automotive domain

GDR Ondes - 29/30 oct2025

Abstract

I am pleased to present Valeo's recent technical work focusing on innovative solutions for automotive applications. This presentation will showcase two distinct projects that highlight the advanced capabilities of metasurface design.

Project 1: Monochromatic Visible Metalens (Design and Manufacturing)

The first project involves the design and implementation of monochromatic visible metalens using dielectric metasurfaces. Engineered to operate in the visible spectrum, this metalens offers significant advantages for automotive applications. By leveraging precise control over phase, amplitude, and polarization provided by dielectric metasurfaces, this metalens achieves superior energy efficiency, compact device design, and increased image resolution. Its scalable design allows for seamless integration into large-scale automotive components, presenting a viable solution for next-generation automotive light projection for extended signaling or welcome scenarios.

Project 2: Structural Color Surfaces (Design and Manufacturing)

The second project explores the development of structural color surfaces by combining plasmonic metasurfaces with Fabry-Perot cavities, these surfaces achieve specific reflective color effects through the careful manipulation of light at the nanoscale, showcasing their versatility and potential for automotive applications. These surfaces are designed to produce high visibility during daytime, low-energy consumption, and view-angle independent colors through subwavelength-scale structures. Structural color surfaces offer lightweight films compatible with extreme environmental conditions, reducing overall vehicle weight presenting a viable solution for next-generation automotive signaling for central panels applications.

Both projects highlight the power of Ansys Lumerical tools in simulating and optimizing complex metasurface structures, enabling groundbreaking advancements in automotive technology. This presentation will be supported by a single and comprehensive slide, illustrating key design principles, simulation results, and potential applications. Join me as we delve into the future of automotive optics and coatings, where nano-precision engineering meets innovative materials science.

Cordialement/Best regards/Mit freundlichen Grüßen

Dr. Eduardo ALVEAR

R&I Expert Diffractive Optics

Valeo Lighting Systems

34 rue Saint Andre - 93000 - Bobigny (FRANCE)

Tel : + 33 1 49 42 31 75

Mail : eduardo.alvear@valeo.com



**Augmented
Visibility**

Enabling Meta-surface Design with OptSimBox: Integrating Neural Network Technologies.

Denis RIDEAU¹, Mathys LE GRAND¹, Damien MAITRE^{1,2}, Loumi TREMAS^{1,3}, Habib MOHAMAD¹, Louis Henri FERNANDEZ MOURON^{1,4}, James DOWNING⁵

¹ STMicroelectronics, 850 rue J. Monnet BP16, 38926 Crolles, France

² Univ. Jean Monnet, CNRS, Institut d'Optique Graduate School, Laboratoire Hubert Curien UMR 5516, F-42023, Saint-Etienne, France

³ IOGS Université Paris Saclay, 2 Av. Augustin Fresnel, 91120 Palaiseau, France.

⁴ Université Paris Dauphine Place du Maréchal de Lattre de Tassigny, 75775 Paris, France ;

⁵ Tanfield, Inverleigh Row, Edinburgh, UK;

Denis.rideau@st.com

1. Introduction

Traditional pillar-wise-based methods for designing meta-surfaces [1-3] face significant constraints, primarily related to the computational burden and difficulty in accurately modeling the complex inter-pillar interactions crucial for optimal performance. These limitations often bottleneck the design process, leading to a significant rejection rate for designs later in the verification stages due to unsatisfactory optical performance (e.g., unwanted zeroth orders in beam shapers). To address these challenges, our latest advancements leverage the OptSimBox toolbox to revolutionize the design of large-scale meta-surfaces. The core innovation lies in the integration of AI-driven capabilities, specifically convolutional neural network (CNN)-driven emulations.

This AI integration provides two key design advantages: Accelerated Design Verification: The CNN emulators enable the rapid simulation of large-scale structures, drastically speeding up the design loop compared to conventional methods. The core power of the CNN emulators stems from their inherent differentiability. This capability, enabled by autodifferentiation, allows the system to efficiently calculate the exact sensitivity of the output optical performance (e.g., beam shape) with respect to every single structural parameter (like pillar width). Instead of relying on brute-force verification, this means the toolbox can directly backpropagate the error between the simulated and the desired performance.

2. Simulation Framework

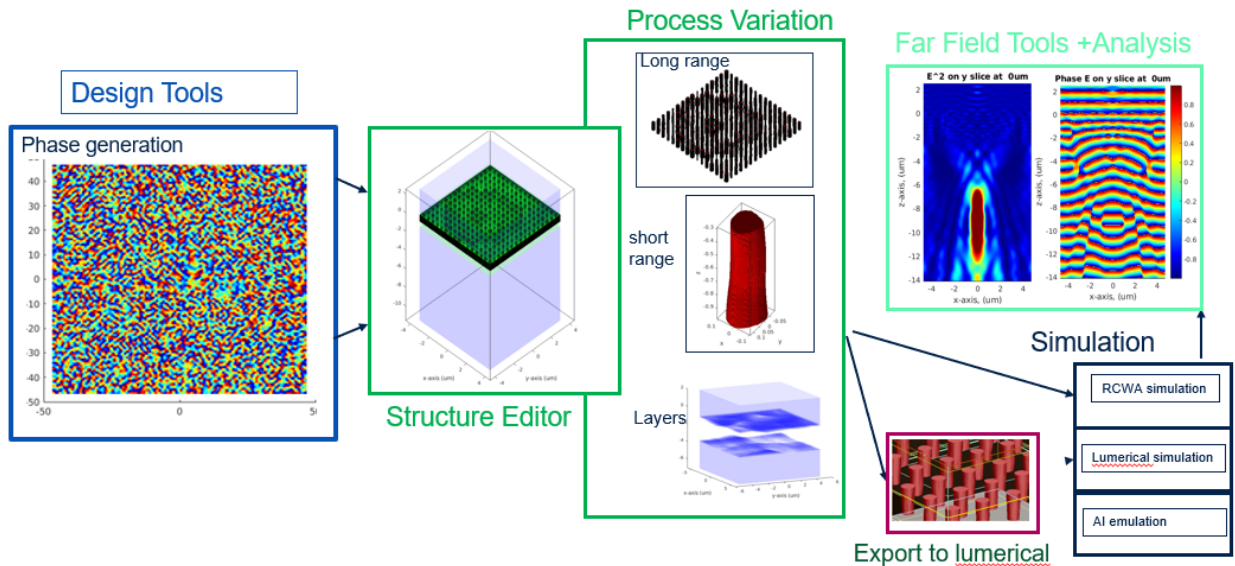


Fig. 1. OptSimBox simulation toolbox: From design to the extraction of the figure of Merit.

The OptSimBox toolbox (see Figure 1) is a comprehensive platform designed to streamline the entire workflow for developing high-performance meta-surfaces, from initial design concepts to final simulation and optimization. It is composed of several modules enabling optical design, structure edition, simulation with internal solvers (based on RCWA method), interface with external FDTD solver [4], and figure of merit

processing and visualization. Using this framework, database based on an automatic generation of relevant designs for supervised learning can be efficiently generated.

3. Surrogate Models and Inverse Design

The most significant advancements in OptSimBox center on its use of Artificial Intelligence to accelerate the design process:

- **Rigorous AI Meta-surface Modeling:** The toolbox integrates Matlab-based AI Models to accurately predict and model complex meta-surface behavior.
- **Inverse Design Capabilities:** It employs advanced methods like Inverse Design with Auto Differentiation and Inverse Design with Diffusion Models. This allows users to specify the desired optical output and have the toolbox automatically calculate the necessary meta-surface geometry.
- **Optimization for Optics:** It offers powerful optimization techniques, including Gradient-based and multi-objective Global Optimization, ensuring designs are robust and reach peak performance efficiently.

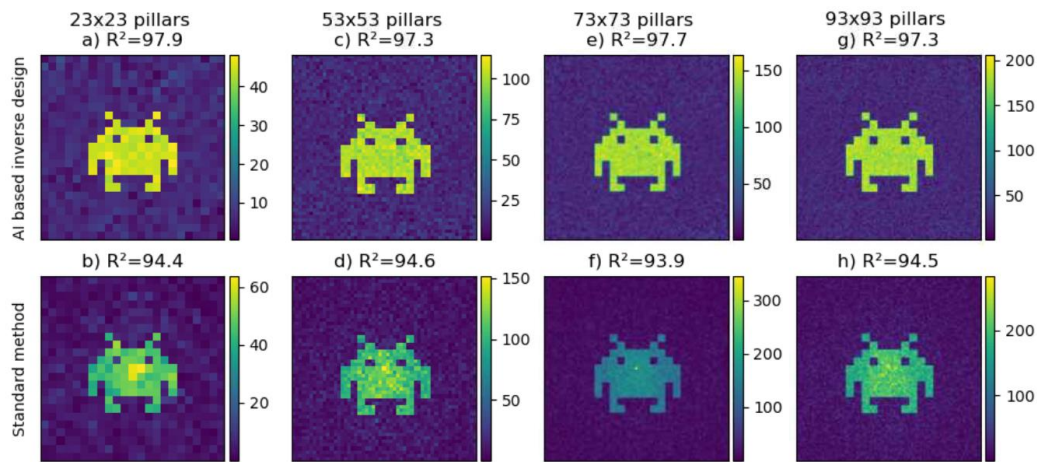


Fig. 2. Typical exemple for inverse design using a standard method (botom) and compared to AI-based solution (top). The R^2 is the least square error calculated vs the target.

Figure 2 compares a standard design methodology using traditional pillar-wise-based methods compared to Ai-based inverse ones. The results (here the far fields after the designed beam shapers) are obtained using a rigorous FDTD simulation and a clear improvement is visible for the AI-based inverse design. Beyond gradient-based optimization, recent advances in generative modeling have opened new avenues for inverse design. Techniques such as diffusion models and Schrödinger bridges [6] provide powerful frameworks for inverse design.

4. Bibliography

[1] S. So, J. Mun, J. Park, and J. Rho, “Revisiting the Design Strategies for Metasurfaces: Fundamental Physics, Optimization, and Beyond”, *Adv. Mater.* 35, 2206399, 2023. [2] C. Gigli, Q. Li, P. Chavel, G. Leo, M. L. Brongersma, and P. Lalanne, “Fundamental limitations of huygens’ metasurfaces for optical beam shaping,” *Laser & Photonics Reviews*, vol. 15, no. 8, p. 2000448, 2021. [3] J. Hu, S. Bandyopadhyay, Y. Liu, and L. Shao, “A Review on Metasurface: From Principle to Smart Metadevices”, doi: 10.3389/fphy.2020.586087, 2021. [4] Lumerical Inc. , FDTD. [5] S. An, B. Zheng, M. Y. Shalaginov, H. Tang, H. Li, L. Zhou, Y. Dong, M. Haerinia, A. M. Agarwal, C. Rivero-Baleine, et al., “Deep convolutional neural networks to predict mutual coupling effects in metasurfaces,” *Advanced Optical Materials*, vol. 10, no. 3, p. 2102113, 2022. [6] Zhang, Z., Yang, C., Qin, Y., Feng, H., Feng, J., & Li, H. (2023). Diffusion probabilistic model based accurate and high-degree-of-freedom metasurface inverse design. *Nanophotonics*, 12(20), 3871-3881.

**Développer des technologies numériques pour la formation, fondées sur
L'analyse de leur efficacité, l'usage et les performances d'apprentissage**

Florian Larrue

Centre Aquitaine des Technologies de l'Information et Electroniques (CATIE)
*f.larrue@catie.fr***Résumé***Dans le cadre des projets menés par le CATIE, nous présentons 2 sujets :*

- *Une application de Réalité Virtuelle qui permet de monitorer le comportement de l'apprenant, ainsi que l'ensemble des gestes métiers que celui-ci a effectué sur une tâche de maintenance aéronautique. Nous présentons également différentes données pour caractériser le geste métier et personnaliser la formation.*
- *Le projet Phoenix(Projet DEFFINUM) ayant pour objectif de développer des outils numériques pour la formation en photonique testés et validés en termes de performances d'apprentissage et d'acceptabilité.*

1. Introduction

Créé en 2014 près de Bordeaux, le CATIE est un Centre de Ressources Technologique soutenu par la Région Nouvelle-Aquitaine pour répondre à un objectif : soutenir les PME et les ETI dans leur transformation numérique. Il assure en particulier le lien entre les laboratoires de recherche et les entreprises pour apporter des solutions innovantes à ces dernières, dans trois domaines :

- Algorithmes et données (intelligence artificielle),
- Systèmes cyber-physiques (électroniques)
- Systèmes centrés sur l'humain (facteurs humains).

Le soutien aux entreprises intervient à différentes étapes : preuves de concept, conseil, assistance, avis et solutions d'experts mais également vision innovante et analyse pluridisciplinaire. Le CATIE aide à lever les verrous technologiques et d'usages rencontrés par les structures qui nous consultent. Elles peuvent ainsi adopter et intégrer des technologies novatrices, acquérir de nouvelles connaissances, avoir accès à des ressources supplémentaires ou monter en compétences.

2. L'équipe Systèmes Centrés sur l'Humain : une approche centrée utilisateur pour le développement de technologies innovantes pour la formation

L'équipe Systèmes Centrés sur l'Humain du CATIE, est composée d'une quinzaine d'ingénieurs et docteurs, qui mêlent les sciences humaines et sociales (ergonomie, sciences cognitives, physiologie, neurosciences, etc.) à la technologie (réalité virtuelle, augmentée, mixte, tablette, PC, montres connectées, etc.) Nous accompagnons les entreprises dans le développement de technologies numériques en prenant en compte les capacités des utilisateurs finaux, afin d'en améliorer leurs usages, et leurs acceptabilités. Dans un monde où le numérique responsable devient une priorité, il est nécessaire de sensibiliser les entreprises innovantes aux développements technologiques numériques raisonnés en fonction de la plus-value apportée à l'utilisateur, et l'ensemble des coûts de développements associés.

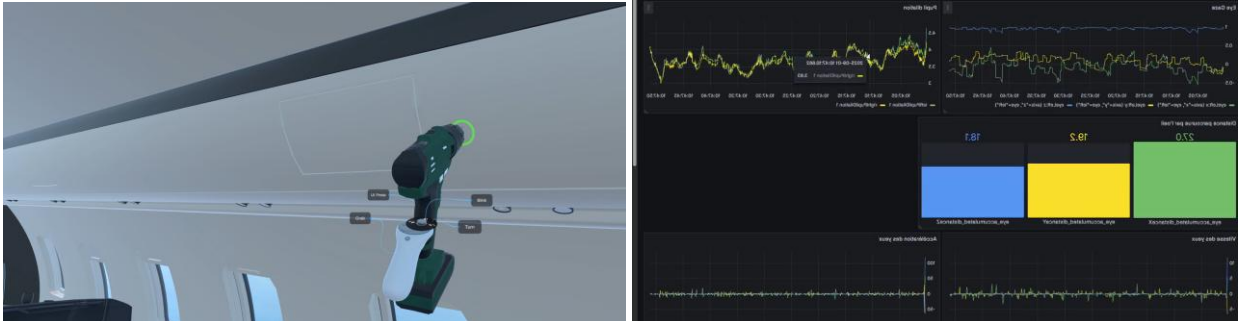
Nous travaillons sur des méthodologies qui prennent en compte, de manière très amont dans le cycle de conception, les capacités humaines, l'ensemble des besoins et contraintes utilisateurs métiers, les avantages/contraintes de la technologie, les utilisateurs finaux dans leur ensemble. En effet, de nombreuses entreprises mettent en avant d'abord la technologie, en pensant ensuite au vrai besoin et l'usage final. La technologie peut apporter des avantages indéniables, mais également certaines contraintes, voire être contreproductive.

Nos retours, ainsi que nos méthodes sont également accessibles via notre plateforme d'évaluation cognitive et comportementale pour l'humain Peacch. Cette plateforme web en ligne (<https://app.peac2h.io/>), complètement gratuite, met à disposition des entreprises, des outils d'évaluation, des questionnaires, des protocoles expérimentaux, que nous utilisons constamment dans nos projets pour

effectuer nos tests de performances d'usage et acceptabilité de nos solutions numériques.

3. Résultats

- 1) Dans le cadre de notre recherche interne autour des nouvelles technologies numériques pour la formation, les apprentissages et le knowledge management, nous présentons une application de réalité virtuelle qui simule le geste métier d'un compagnon sur une tâche de perçage. Notre objectif est de déterminer de nouvelles méthodologies innovantes, issues des données comportementales et de mouvement des technologies immersives, qui permettent de mieux capitaliser le geste métier, de le stocker, et d'affiner la performance d'apprentissage ainsi que la personnalisation de la formation.

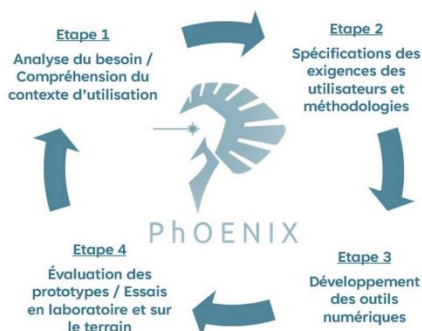


- 2) Le projet Phoenix est un projet Deffinum constitué de Pyla, le centre de formation du CRT Alphanov, de Photonics France, l'association nationale de promotion de la photonique, et le Catie. Ce projet de 3 ans développe des dispositifs technologiques de formation à la photonique clés en main sous 3 formes :

- Des modules de VR dans un laboratoire de photonique immersif (i.e., TP virtuels)
- Des vidéos pédagogiques d'illustration des phénomènes
- Une plateforme en ligne de formation aux mathématiques pour l'optique.
- L'usage des IA génératives dans un contexte de formation.

Dans ce cadre, le CATIE développe également des méthodologies d'évaluation d'impact des solutions technologiques de formation. Ces méthodologies sont doubles : elles comprennent une partie générique (i.e., à destination de n'importe quel domaine de formation) et une partie adaptée aux dispositifs développés dans le cadre du projet (e.g., impact de l'utilisation d'un TP VR sur les compétences en Alignement laser). Enfin, nous développons des supports d'accompagnements aux formateurs quant aux solutions technologiques de formation en général. Ces supports portent à la fois sur le soutien à la conception des dispositifs de formation (e.g., fiches de bonnes pratiques de conception de vidéos pédagogiques) et sur l'accompagnement à l'inclusion des dispositifs de formation au sein des séquences pédagogiques (e.g., guide à l'utilisation d'un TP VR dans une formation de photonique).

La Conception Centrée Utilisateur



Affiche GT1

Entrainement d'une onde par un plasma : couplage entre moment angulaire de l'onde et rotation

R. Gueroult¹, A. Braud¹, J. Langlois¹

¹ : Laboratoire Laplace, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS, 31062 Toulouse, France

Résumé

Nous présentons les résultats obtenus sur les effets du mouvement sur la propagation des ondes dans un plasma en mouvement, et notamment sur l'effet de la rotation d'un plasma sur les propriétés de moment angulaire de spin et orbital d'une onde se propageant en son sein.

1. Introduction

Le fait que les propriétés de propagation d'une onde dans un milieu sont modifiées selon si ce milieu est au repos ou en mouvement par rapport à l'observateur est bien connu depuis les travaux historiques de Fresnel et Fizeau. Dans les diélectriques isotropes la théorie de ces effets est relativement bien établie, et montre notamment que la rotation d'un milieu affecte à la fois les composantes de moment angulaire de spin (polarisation) et orbital (structure transverse). Ces effets sont néanmoins faibles dans les conditions usuelles. L'étude de ces effets dans un milieu anisotrope tel qu'un plasma magnétisé demeure en revanche très limitée, et ce alors qu'ondes et plasma en mouvement coexistent dans un grand nombre d'environnements et d'applications, et que la théorie isotrope laisse à penser que ces effets pourraient être amplifiés dans les plasmas. L'objet de ce poster est de présenter les développements théoriques menés pour modéliser ces effets, et les premiers résultats de validation expérimentale.

2. Effet de la rotation sur le moment angulaire d'une onde

Une onde se propageant parallèlement à l'axe de rotation d'un diélectrique isotrope est affectée par le mouvement sous deux formes, comme illustré Figure 1. Un premier effet correspond à un entrainement azimuthal du faisceau, lié à l'introduction d'une composante azimuthale à la vitesse de groupe vue du laboratoire, conduisant au phénomène de rotation d'image [1] (Fig. 1, droite). Un second effet est un entrainement mécanique de la polarisation de l'onde [2] (Fig. 1, gauche). Ces deux effets résultent d'une différence de phase introduite par la rotation entre d'une part les composantes opposées de moment orbital de spin (polarisation circulaire $\pm\hbar$), et d'autre part de moment orbital angulaire ($\pm m\hbar$ avec $m \in \mathbb{Z}$) [3]. Dans un milieu isotrope classique ces effets dépendent tous deux du coefficient de Fresnel, avec une rotation

$$\Delta\phi = \frac{\Omega l}{c} \left(n_g - \frac{1}{n_\phi} \right)$$

après avoir parcouru une distance l dans le milieu, où n_g et n_ϕ sont les indices de groupe et de phase, et Ω est la vitesse angulaire de rotation du milieu.

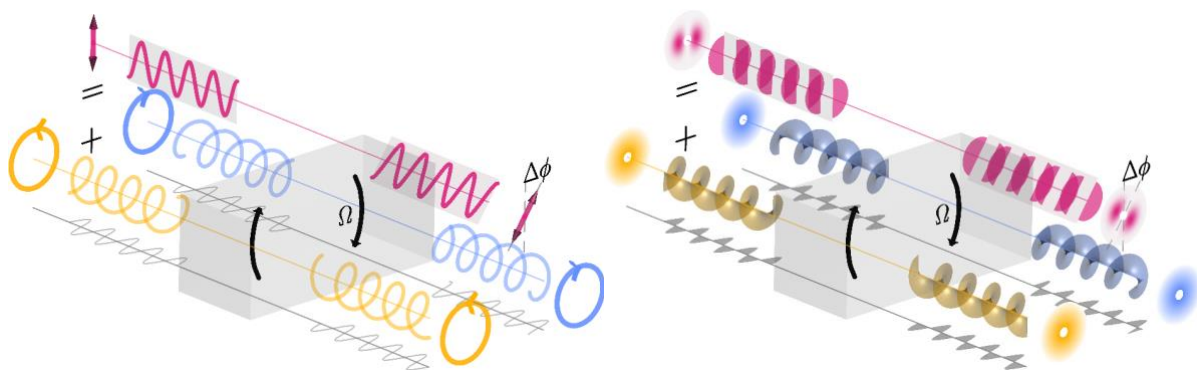


Figure 1. Entrainement de la polarisation (gauche) et rotation de l'image (droite). Ces deux effets traduisent un couplage entre la rotation du milieu et les moments angulaires de spin et orbital de l'onde.

3. Dans un plasma magnétisé

L'étude théorique de ces effets dans un milieu anisotrope tel qu'un plasma magnétisé a permis au cours de ces dernières années de confirmer que la rotation avait bien un effet sur les composantes de moment angulaire de l'onde, mettant en évidence un certain nombre d'analogies mais aussi des différences avec les milieux isotropes [5]. Une première différence concerne l'effet sur la composante de spin de l'onde : dans un plasma l'effet mécanique vient s'ajouter à la gyrotropie du milieu, ces deux effets contribuant alors simultanément à l'évolution de la polarisation de l'onde. Cette contribution mécanique dans un plasma, jusque-là ignorée, pourrait avoir une importance en astrophysique, notamment pour la polarimétrie pulsar [6], mais aussi possiblement permettre de nouvelles méthodes de manipulation des ondes [7]. Une seconde différence réside dans le fait que l'existence d'ondes lentes ($n_g \gg 1$) dans des conditions naturelles dans les plasmas peut conduire à des effets amplifiés. Un exemple est le cas des ondes d'Alfvén, très répandues dans les plasmas spatiaux et en astrophysique, pour lesquelles une vitesse de groupe égale à la vitesse d'Alfvén $v_A = B_0/(\mu_0 m_i n)$ suggère des effets notables dès lors que la vitesse du milieu est comparable à v_A . Ces prédictions théoriques ont récemment pu être confirmées, avec une rotation d'image de plusieurs dizaines de degrés observée dans un plasma après quelques mètres de propagation seulement [8]. Une troisième différence vient du fait que les effets inertiels, usuellement négligés dans les diélectriques solides, peuvent jouer un rôle important dans les plasmas [9].

4. Conclusion

Dans cette contribution, nous avons présenté comment la rotation d'un plasma peut affecter les composantes de moment angulaire de spin et orbital d'une onde, mettant en évidence des similarités avec ces effets tels que connus dans les diélectriques isotropes, mais aussi des différences importantes. Ces résultats suggèrent que ces effets pourraient jouer un rôle dans différents environnements, ou encore permettre de nouvelles applications des plasmas. Une extension prometteuse concerne l'interaction entre ces composantes de moment angulaire, i. e. les phénomènes de couplage spin-orbite, dans les milieux en mouvement [10].

5. Remerciements

Cette recherche a été financée, en partie, par l'Agence nationale de la recherche (ANR) au titre du projet ANR WaRP (ANR-21-CE30-0002).

6. Bibliographie

- [1] Padgett M *et al.*, Polarization and image rotation induced by a rotating dielectric rod: an optical angular momentum interpretation, *Opt. Lett.*, **31**, 2205, 2006.
- [2] Franke-Arnold S *et al.*, Rotary Photon Drag Enhanced by a Slow-Light Medium, *Science*, **333**, 65, 2011.
- [3] Jones R V, Rotatory aether drag, *Proc. R. Soc. A*, **349**, 423, 1976.
- [4] Gotte J B, Barnett S M and Padgett M, On the dragging of light by a rotating medium, *Proc. R. Soc. A*, **463**, 2185, 2007.
- [5] Gueroult R *et al.*, Wave propagation in rotating magnetised plasmas, *Plasma Phys. Control. Fusion*, **65**, 034006, 2023
- [6] Gueroult R *et al.*, Determining the rotation direction in pulsars, *Nature Comm.* **10**, 3232, 2019
- [7] Gueroult R *et al.*, Enhanced tuneable rotatory power in a rotating plasma, *Phys. Rev. E* **102**, 051202, 2020
- [8] Gueroult R *et al.*, Image Rotation in Plasmas, *Phys. Rev. Lett.* **134**, 245101, 2025
- [9] Langlois L and Gueroult R, Manifestations of inertia on light dragging revealed in plasmas, *Proc. R. Soc. A*, **480**, 2301, 2024.
- [10] Braud A and Gueroult R, Spin-orbit interactions induced by light drag in moving media, *arXiv*, 2505.08621, 2025

Interaction spin-orbite dans les milieux en mouvement

A. Braud, R. Gueroult

LAPLACE, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS, 31062 Toulouse, France
 aymeric.braud@laplace.univ-tlse.fr

Résumé

Dans le cadre d'une étude plus générale des effets du mouvement du milieu sur la propagation des ondes, nous présentons ici les résultats théoriques obtenus sur la manifestation d'une interaction spin-orbite induite par le mouvement. L'effet sur la polarisation résultant de cette interaction vient s'ajouter à un effet d'entraînement mécanique du milieu pour donner lieu à une rotation de la polarisation de l'onde au cours de sa propagation.

1. Introduction

Les ondes électromagnétiques possèdent des degrés de liberté spatiaux (ou orbitaux) mais aussi de polarisation (ou spin) dus à leur nature vectorielle. Les équations de Maxwell couplent ces degrés de liberté de sorte qu'ils peuvent interagir entre eux [1]. Déjà connue en mécanique quantique, une telle *interaction spin-orbite (SOI)* pour les ondes électromagnétiques a été montrée pour la première fois par Rytov [2] en 1938 au travers d'un effet de la trajectoire de l'onde sur sa polarisation. Ce phénomène est plus tard relié au concept de phase géométrique de Berry montrant par là son origine purement géométrique [3]. On distingue alors deux types de SOI [4] : celle due à la phase de redirection de spin dite de Rytov-Vladimirski-Berry et celle due à la phase de Pancharatnam-Berry provenant d'un changement de l'état de la polarisation. On ne s'intéressera ici qu'à la première, qui survient typiquement lors de la propagation dans un milieu inhomogène à gradient d'indice [1] ou dans une fibre optique twistée [5].

Dans le cadre de l'optique géométrique (OG), les trajectoires des ondes sont modélisées par des rayons [6]. Sous ces hypothèses, il a été montré que, dans un milieu isotrope non-dispersif (MIND) à gradient d'indice, les variations de direction du rayon entraînent une redirection du plan de polarisation causant l'accumulation de phases de redirection de spin par les modes [1]. Ces phases sont à l'origine du transport parallèle de la polarisation de l'onde le long du rayon. Si ce dernier est non-planaire, autrement dit s'il a une torsion non-nulle, ce transport parallèle mène à une rotation de la polarisation dans son plan. L'objet de cette communication est de montrer qu'une telle SOI est aussi présente dans un milieu en mouvement même si celui-ci est homogène.

2. Entraînement des ondes électromagnétiques par le mouvement du milieu

Depuis les travaux historiques de Fresnel et Fizeau, il est établi que le mouvement du milieu de propagation peut altérer la vitesse de l'onde. Les expériences ultérieures de Jones [7] ont montré qu'il pouvait même la dévier, révélant un entraînement de l'onde par le milieu en mouvement. Dans l'approximation de l'OG, en utilisant les équations de tracé de rayon, il a été prédit théoriquement que des mouvements non-uniformes pouvaient courber les rayons [8,9] voire même les rendre non-planaires [10], à l'instar d'un MIND statique à gradient d'indice (Figure 1c), comme illustré sur la Figure 1a. La différence avec un MIND statique est que la vitesse de groupe, qui est tangente au rayon, n'est pas alignée avec le vecteur d'onde dans le cas du MIND en mouvement [11] (Figure 1b). La direction du rayon n'est donc plus liée exclusivement au vecteur d'onde mais a maintenant une dépendance spatiale supplémentaire liée à la vitesse du milieu. Or nous avons récemment montré [12] que le plan de polarisation du champ électrique est, comme dans un MIND statique, normal à la vitesse de groupe et donc au rayon. Un rayon courbé par le mouvement entraîne donc une redirection du plan de polarisation entièrement due à celui-ci.

3. Phase de redirection de spin due au mouvement et effet sur la polarisation

La redirection du plan de polarisation entraîne non seulement une connexion de Berry associée au vecteur d'onde, comme dans les MIND statiques, mais aussi une connexion de Berry associée à la coordonnée spatiale. Cette dernière est due à la dépendance spatiale de la vitesse de groupe. Ces deux

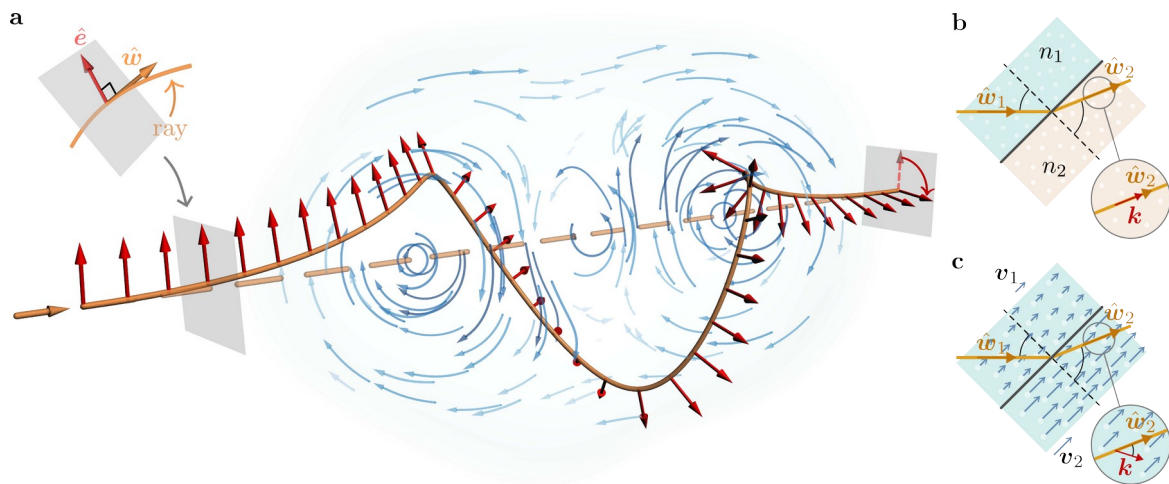


Figure 1 : **a** Illustration d'un rayon non-planaire (orange) entraîné par le milieu en mouvement non-uniforme (lignes de courant bleues) et de la rotation de la polarisation associée (rouge) résultant de l'interaction de spin-orbite induite. Une déviation du rayon provient de façons analogues soit **b** d'un changement d'indice de réfraction, soit **c** d'une variation de vitesse du milieu.

connexions peuvent s'écrire sous la forme d'une seule connexion de Berry associée à la direction de la vitesse de groupe ayant une forme analogue à celle sur le vecteur d'onde dans les MIND statiques [1]. Cela prouve que la phase géométrique est une phase de redirection de spin due à la redirection de la vitesse de groupe.

En s'intéressant à l'équation de transport du vecteur unitaire de polarisation résultant de la superposition des deux modes, on se rend compte que la dynamique de la polarisation totale est gouvernée par deux contributions : le transport parallèle et l'entraînement mécanique. La première vient de la phase de redirection de spin (de Rytov-Vladimirski-Berry) et la seconde décrit un effet d'entraînement déjà connu dans les diélectriques [13,14] et dans les plasmas magnétisés [15]. Ensemble, ces deux effets provoquent une rotation de la polarisation de l'onde lors de sa propagation.

4. Conclusion

Dans cette contribution, nous mettons en évidence une interaction spin-orbite purement induite par le mouvement du milieu dans lequel l'onde se propage. En courbant la trajectoire de l'onde, le mouvement provoque une redirection du plan de polarisation qui génère une phase géométrique de redirection de spin (ou de Rytov-Vladimirski-Berry) similaire à celle issue de rayons courbés dans un milieu statique à gradient d'indice. Cette phase géométrique traduit en fait le transport parallèle de la polarisation physique de l'onde le long du rayon. Ce transport parallèle conjointement avec l'entraînement mécanique de la polarisation, déjà connu, mènent à une rotation de la polarisation au cours de la propagation de l'onde dans le milieu en mouvement.

Le formalisme théorique employé dans cette étude est à portée très générale et pourrait donc permettre d'obtenir des résultats d'interaction spin-orbite pour des milieux plus complexes en mouvement comme des plasmas.

5. Remerciements

Cette recherche a été financée, en tout ou partie, par l'Agence nationale de la recherche (ANR) au titre du projet ANR WaRP (ANR-21-CE30-0002). Les auteurs remercient Julien Langlois pour sa contribution précieuse au projet.

6. Bibliographie

- [1] K. Y. Bliokh, "Geometrodynamics of polarized light: Berry phase and spin Hall effect in a gradient-index medium," J. Opt. Pure Appl. Opt., vol. 11, no. 9, p. 094009, 2009.
- [2] S. M. Rytov, "Sur la transition de l'optique ondulatoire à l'optique géométrique," Dokl Akad Nauk SSSR, vol. 18, no. 4-5, pp. 263-266, 1938.

- [3] M. V. Berry, “Quantal Phase Factors Accompanying Adiabatic Changes,” 1984.
- [4] K. Y. Bliokh, Y. Gorodetski, V. Kleiner, and E. Hasman, “Coriolis Effect in Optics: Unified Geometric Phase and Spin-Hall Effect,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 101, no. 3, p. 030404, 2008.
- [5] M. V. Berry, “Interpreting the anholonomy of coiled light,” *Nature*, vol. 326, no. 6110, pp. 277–278, 1987.
- [6] E. R. Tracy, Ed., *Ray Tracing and Beyond: phase space methods in plasma wave theory*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2014.
- [7] R. V. Jones, “‘Fresnel Aether Drag’ in a Transversely Moving Medium,” *Proc. R. Soc. Lond.*, vol. 328, pp. 337–352, 1972.
- [8] U. Leonhardt and P. Piwnicki, “Optics of nonuniformly moving media,” *Phys. Rev. A*, vol. 60, no. 6, pp. 4301–4312, 1999.
- [9] A. D. M. Walker, “Ray Tracing of Magnetohydrodynamic Waves in Geospace,” no. 325, 2008.
- [10] N. N. Rozanov and G. B. Sochilin, “Geometrical optics of moving media,” *Opt. Spectrosc.*, vol. 98, no. 3, pp. 441–446, 2005.
- [11] A. Braud, J. Langlois, and R. Gueroult, “Geometrical optics methods for moving anisotropic media: a tool for magnetized plasmas,” *Comptes Rendus Phys.*, vol. 26, no. G1, pp. 7–23, 2025.
- [12] A. Braud and R. Gueroult, “Spin-orbit interactions induced by light drag in moving media,” May 13, 2025, arXiv: arXiv:2505.08621.
- [13] M. A. Player, “On the dragging of the plane of polarization of light propagating in a rotating medium,” *Proc. R. Soc. Lond. Math. Phys. Sci.*, vol. 349, no. 1659, pp. 441–445, 1976.
- [14] R. V. Jones, “Rotary ‘aether drag,’” *Proc B Soc Lond A*, vol. 349, pp. 423–439, 1976.
- [15] R. Gueroult, Y. Shi, J.-M. Rax, and N. J. Fisch, “Determining the rotation direction in pulsars,” *Nat. Commun.*, vol. 10, no. 1, p. 3232, 2019.

Impact of disorder on the radiative efficiency of bound states in the continuum in dimer gratings

V. Kalt¹, E. Centeno², R. Smaali², A. Moreau²

¹ : Laboratoire Hubert Curien, CNRS UMR 5516, Université Jean Monnet, Saint-Etienne

² : Université Clermont Auvergne, Clermont Auvergne INP, CNRS, Clermont-Ferrand, France
victor.kalt@univ-st-etienne.fr

Abstract

A dimer grating is engineered to increase the light emission of a dipole source in the normal direction through the transformation of a bound state in the continuum (BIC) into a quasi-BIC (QBIC). We study the effect of controlled and structural disorder on the structure.

1. Introduction

The design of photonic structures capable of enhancing the emission of quantum emitters is an active area of research [1] with applications in lighting, imaging... The performance of those structures is measured by the radiative enhancement (RE), product of the emitters normalized decay rate and the light extraction efficiency. Periodic gratings supporting symmetry-protected BICs have been proposed as an efficient solution to increase light emission in off-normal directions [2, 3]. In this work, we study a dimer grating where asymmetry is introduced to transform the BIC into a QBIC radiating at the Γ point.

2. Description of the structure

The dimer grating of period $2 \times D = 2 \times 420$ nm is built from TiO₂ ribbons of height $h = 150$ nm and width $w = D/2$ separated by a distance L . A 200 nm TEOS cover layer protects the grating and contains a dipole which is centered between the dimer elements and emits light at a wavelength $\lambda = 618.5$ nm. Figure 1 presents the two kinds of perturbations we consider: width variations $w \pm \Delta w$ and gap variations $L \pm \Delta L$, respectively characterized by parameters $\alpha = \Delta w/w$ and $\beta = \Delta L/L$. All simulations are performed using the quasi-normal mode method [4].

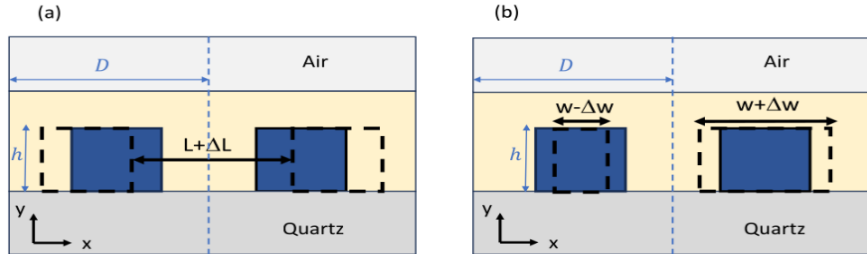


Figure 1. Schematic of a dimer grating made of two TiO₂ ribbons embedded in a TEOS layer.

3. Results

The symmetry of the dimer structure ($\alpha = \beta = 0$) leads to a BIC existing at the Γ point. The infinite Q-factor of the mode increases the dipole emission through the Purcell effect but prevents the light extraction from the structure, resulting in a null radiative enhancement. Through a breaking of the dimer symmetry induced by α and β perturbations, we observe a radiative enhancement at the Γ point which can be explained as the transformation of the BIC into a QBIC with a lower Purcell factor but a non-zero light extraction efficiency. RE values up to 1600 are obtained in the normal direction with the dimer grating. RE values for both structures are presented in figure 2.

Structural disorder induced by fabrication imperfection is another source of asymmetry. It is known that BICs and QBICs are sensitive to this kind of disorder [5]. We study its effect on the dimer structure by independently randomly perturbing the position and width of the elements in a supercell. Results

presented in figure 3 show that structural disorder on the ribbon's width greatly reduces the RE by splitting the QBIC energy on multiple wavelength. Conversely, the dimer structure is robust to structural disorder on the position of the elements.

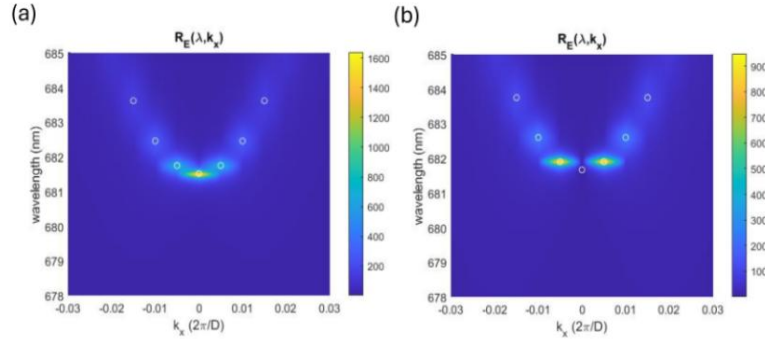


Figure 2 : Directive radiative enhancement coefficient $RE(\lambda, k_x)$ calculated: (a) for the dimer structure with $\alpha = 0$ and $\beta = 0.08$, (b) for the regular grating with $\alpha = 0$ and $\beta = 0$.

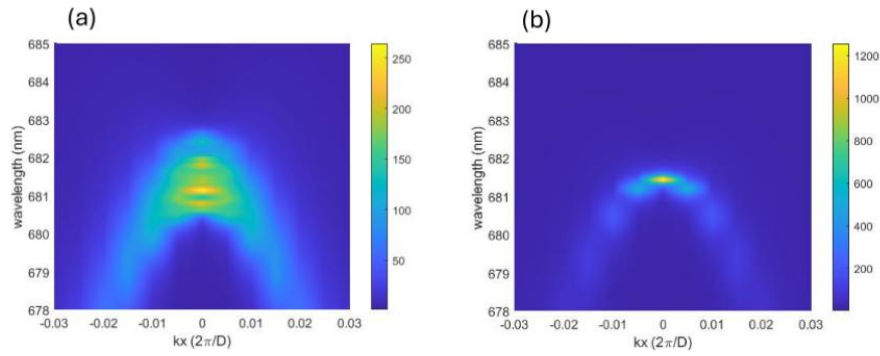


Figure 3 : Average RE (λ, k_x) for the dimer grating with ($\alpha = 0$, $\beta = 0.08$) calculated for a perturbation strength $\delta = 1.2\%$: (a) when disorder only affects the width of the ribbons, (b) when disorder only impacts the position of the ribbons

4. Conclusion

These results reveals that dimer gratings are more efficient than regular gratings for enhancing the spontaneous emission of QE even in presence of structural disorder. A strong disorder (larger than 10%) however leads to similar efficiencies for both dimer and regular gratings.

5. Remerciements

The authors thank the French “Agence Nationale de la Recherche” in the framework of the COULEURS project (ANR-22-CE39-0013).

6. References

- [1] Vaskin A., Kolkowski R., Koenderink A. F. and Staude I., Light-emitting metasurfaces, *Nanophotonics*, vol. **8**, pp. 1151, 2019.
- [2] Farazi S. and Tadiyaga S., Coherent light-emitting metasurfaces based on bound states in the continuum, *Nanophotonics*, vol. **13**, pp. 2915-2924, 2024.
- [3] Liu L., Wang R., Sun Y., Jin Y. and Wu A., Fluorescence enhancement of PbS colloidal quantum dots from silicon metasurfaces sustaining bound states in the continuum, *Nanophotonics*, vol. **12**, 2023.
- [4] Sauvan C., Hugonin J.-P., Maskymov I. S. and Lalanne P., Theory of the spontaneous optical emission of nanosize photonic and plasmon resonators, *PRL*, vol. **110**, 2013.
- [5] Maslova E., Rybin M., Bogdanov A. and Sadrieva Z., Bound states in the continuum in periodic structures with structural disorder, *Nanophotonics*, vol. **10**, pp. 4313-4321, 2021.

De la théorie de Lorenz-Mie à la diffraction de Fresnel

Lilian Chabrol¹, Fabrice Onofri¹

¹ : Université Aix-Marseille, CNRS, UMR 7343, IUSTI, 13453 Marseille, France,
lilian.chabrol@univ-amu.fr

Résumé

Dans un article récemment publié [1], les auteurs montrent comment de nouvelles approximations des fonctions de Hankel permettent d'obtenir la diffraction de Fresnel directement à partir des équations de la théorie de Lorenz-Mie. D'une grande précision, ces approximations permettent notamment de définir une nouvelle formulation – discrète – de la diffraction d'une onde par une particule sphérique. Elles peuvent également être utilisées pour la diffusion d'onde électromagnétique (ou acoustique) non plane par des sphères et cylindres multicouche.

1. Introduction

Pour des particules dont la taille caractéristique est largement supérieure à la longueur d'onde, l'utilisation d'un modèle de diffusion « exact », comme la théorie de Lorenz-Mie (LMT), peut devenir trop gourmande en ressources computationnelles lors de l'utilisation de méthodes inverses. Plusieurs solutions peuvent alors se présenter : changement d'échelle de description des phénomènes physiques [2] (optique physique, géométrique) ; reformulation et/ou approximation mathématique du problème initial [3,4] (transformation de Watson, champ lointain). Outre leur potentiel en termes d'efficacité numérique, ces approximations peuvent également faire émerger des concepts plus intuitifs et plus aisément manipulables que la solution « exacte » (diffraction, réflexion, réfraction, effet tunnel optique, etc.).

En champ lointain (Far-Field, FF), les approximations des fonctions de Hankel pour la LMT sont :

$$h_n^{(1)}(k_1 r) \stackrel{k_1 r \gg n^2}{\simeq} (-i)^n \frac{e^{ik_1 r}}{ik_1 r} \equiv h_{\text{FF},n}^{(1)}(k_1 r) \quad (1)$$

où k_1 désigne le nombre d'onde de l'onde incidente et r la distance observateur-particule [5]. Elles fournissent une approximation de la LMT dans laquelle l'onde diffusée est une somme d'ondes sphériques émises en un unique point – réduisant de fait la particule à un diffuseur ponctuel. Combinées à d'autres hypothèses, elles permettent in fine de retrouver la diffraction de Fraunhofer [6].

Nous proposons ici de nouvelles approximations des fonctions de Hankel qui redonnent sa dimension spatiale à la particule et permettent de retrouver la diffraction de Fresnel à partir de la LMT.

2. Approximation « Near-to-far field » et diffraction de Fresnel

L'expansion en série de la LMT fait intervenir un paramètre n auquel le principe de localisation [6] associe les rayons lumineux dont le paramètre d'impact est $\rho_n = \frac{(n+1/2)}{2\pi} \lambda_1$ avec λ_1 la longueur d'onde de l'onde incidente. S'inspirant de ce principe et de la diffraction de Fresnel d'un disque, nous proposons de nouvelles approximations des fonctions de Hankel [1] :

$$h_n^{(1)}(k_1 r) = (-i)^n \frac{e^{ik_1 r}}{ik_1 r} e^{i \frac{k_1 \rho_n^2}{2r}} \equiv h_{\text{N2F},n}^{(1)}(k_1 r) \quad (2)$$

où N2F signifie « near-to-far field ». Sur la Figure 1, nous comparons les deux approximations FF et N2F aux fonctions de Hankel exactes. L'approximation N2F est nettement supérieure à celle associée au champ lointain, pourvu que $k_1 r$ soit suffisamment supérieur à n , sans quoi les deux approximations ne sont tout simplement pas applicables.

A partir de l'équation (2), il est possible de définir une approximation « near-to-far field » de la théorie de Lorenz-Mie [1]. Celle-ci est bien plus précise que son équivalent en champ lointain, sans pour autant être significativement plus lente. Nous aborderons ces points en détail lors de la présentation.

En faisant l'hypothèse d'une diffusion vers l'avant (angle de diffusion $\theta \ll 1$) et en considérant les coefficients de diffusion externes $a_n = b_n = 1/2$ pour $n \leq \alpha = k_1 a$ (avec a le rayon de la particule),

nous construisons une formulation discrète de la diffraction par une sphère (Lorenz-Mie-Fresnel ou LMF diffraction) :

$$E_{\text{Diff}}^{\text{LMF}}(r, \theta) \equiv iE_0 \frac{e^{ik_1 r}}{r} \sum_{n=1}^{\lfloor \alpha - \frac{1}{2} \rfloor} \rho_n e^{\frac{ik_1 \rho_n^2}{2r}} J_0[k_1 \rho_n \theta] \quad (3)$$

avec J_0 la fonction de Bessel d'ordre 0. Le passage du discret au continu et les approximations $\cos(\theta) \simeq 1$ et $\sin(\theta) \simeq \theta$, valides vers l'avant, permettent finalement d'obtenir la diffraction de Fresnel par un disque de rayon a :

$$E_{\text{Diff}}^{\text{Fre}}(M) = E_0 \frac{k_1}{i} \frac{e^{ik_1 r}}{r} \cos \theta \int_{\rho=0}^a \rho d\rho e^{ik_1 \frac{\rho^2}{2r}} J_0(k_1 \rho \sin \theta) . \quad (4)$$

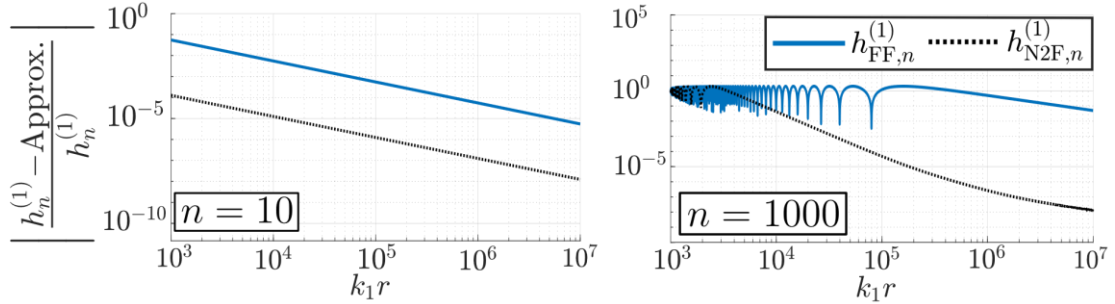


Figure 1 : Comparaison des erreurs relatives des deux approximations FF et N2F.

4. Conclusion

Les nouvelles approximations des fonctions de Hankel (Eq. 2) permettent d'évaluer plus rapidement le champ électromagnétique ou acoustique diffusé par des particules sphériques. Cette évaluation est à la fois plus précise que l'approximation usuelle en champ lointain et permet de considérer des observateur plus proche de la particule. En prenant en compte une diffusion vers l'avant, nous établissons également un lien direct entre la théorie de Lorenz-Mie (électromagnétique) et la diffraction de Fresnel (optique physique).

5. Remerciements

Ce travail a été soutenu par l'Agence Nationale de la Recherche et Bpifrance, références ANR-23-CE51-0023 et PIA-MIRAGE-DOS0196786/00.

6. Bibliographie

- [1] L. Chabrol et F. Onofri, « Near-to-far field approximation of scattering by spheres: bridging the gap between the Lorenz-Mie theory and the Fresnel diffraction », *Opt. Express*, vol. 33, n° 18, p. 38926- 38940, 2025.
- [2] F. R. A. Onofri, S. Radev, M. Sentis, et S. Barbosa, « Physical-optics approximation of near-critical-angle scattering by spheroidal bubbles », *Opt. Lett.*, vol. 37, n° 22, p. 4780, nov. 2012, doi: 10.1364/OL.37.004780.
- [3] H. M. Nussenzveig, *Diffraction Effects in Semiclassical Scattering*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. doi: 10.1017/CBO9780511599903.
- [4] L. Chabrol et F. R. A. Onofri, « Light tunneling and anomalous reflection from the diffraction of complex annuli: modeling the forward light scattering by spherical particles », *Opt. Lett.*, vol. 50, n° 6, p. 2061- 2064, mars 2025.
- [5] « Bohren C.F., Huffman D.R 1983 Absorption and scattering of light by particles.pdf ».
- [6] H. C. Hulst et H. C. van de Hulst, *Light Scattering by Small Particles*. Courier Corporation, 1981.

Améliorer la sensibilité de la SPR grâce aux résonateurs à gap-plasmon

Y. Chardon-Grossard¹, C. Bonduelle², T. Miralles², D. Langevin^{1,2}, D. Duché¹, C. Ruiz-Herrero¹, P. Bennet¹, A. Moreau²

¹ : Aix-marseille Univ, CNRS, IM2NP, Marseille, France

² : Université Clermont Auvergne, CNRS, Institut Pascal, F-63000 Clermont-Ferrand, France

pauline.bennet@univ-amu.fr

Résumé

Les résonateurs à gap-plasmon (GPR) offrent une sensibilité bien supérieure aux capteurs plasmoniques traditionnels grâce à leur fort indice effectif. Nos simulations et l'outil open source GP-Explorer démontrent leur potentiel pour développer des biocapteurs ultrasensibles.

1. Introduction

Les capteurs plasmoniques traditionnels reposent sur la résonance d'un plasmon de surface (SPR) le long d'une interface métal-diélectrique. Lorsqu'il contient des molécules d'intérêt, le milieu environnant le plasmon de surface voit son indice optique modifié et provoque un décalage mesurable de la SPR en longueur d'onde ou en angle. La sensibilité de tels capteurs plasmoniques est limitée par la valeur maximale que peut atteindre l'indice effectif du plasmon de surface. Un gap-plasmon, formé par une couche fine de diélectrique située entre deux métaux, peut quant-à-lui atteindre des valeurs records d'indice effectif (Fig. 1).

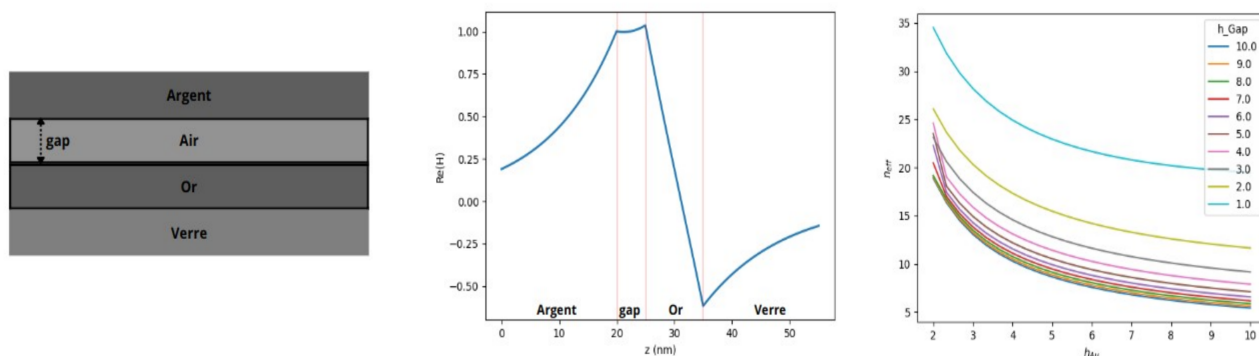


Figure 1: Structure du gap-plasmon (a), son profil de champ magnétique (b) et son indice effectif en fonction des épaisseurs de métal et de diélectrique (c).

2. Structure étudiée

Les résonateurs à gap-plasmon (GPR) sont des nanocubes métalliques séparés d'une surface métallique par un milieu diélectrique. Le gap-plasmon est alors piégé dans une cavité de longueur L formée par les bords du nanocube (Fig. 2). Ce mode présente un indice effectif très élevé, de sorte que même l'adsorption d'une monocouche de biomolécules entraîne une variation mesurable d'indice Δn .

Les travaux présentés ont pour objectif de démontrer, à travers des simulations numériques, que les GPR sont des candidats très prometteurs pour la prochaine génération de biocapteurs, pour des applications nécessitant une détection ultrasensible à proximité immédiate de la surface du capteur.

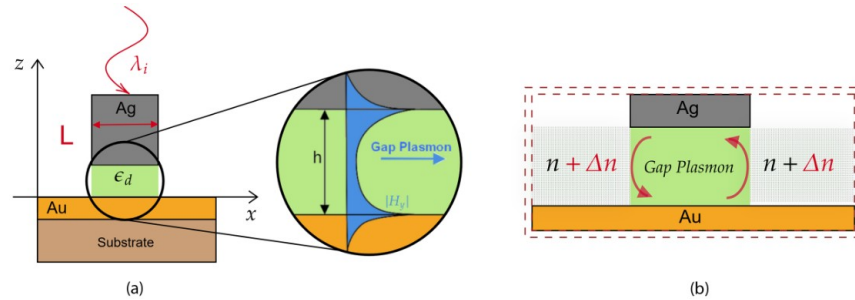


Figure 2: Représentation d'un capteur à gap-plasmon (a) et sensibilité du mode plasmonique à son environnement (b).

3. Sensibilité des résonateurs à gap-plasmon

Le système GPR est modélisé en 2D par une méthode Rigorous Coupled-Wave Analysis (RCWA). Une étude du décalage de la résonance en présence et absence de biomolécules a été réalisée, pour différentes configurations du système (dimension du nanocube, épaisseur de la couche de diélectrique et de la couche de métal sur le substrat) et pour comprendre quelles architectures sont les plus prometteuses pour la détection de biomolécules.

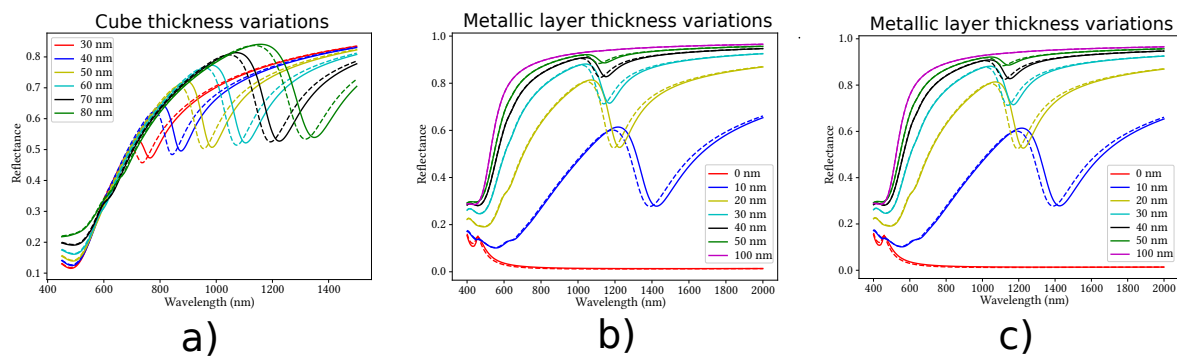


Figure 3: Reflectance du système GPR avec (lignes continues) et sans (tirets) molécules, selon la dimension du cube (a), l'épaisseur de diélectrique (b) et l'épaisseur de métal (c).

4. GP-Explorer, un logiciel dédié à l'étude de la GPR

Une plateforme en accès libre, GP-Explorer, a été créée pour étudier plus en détail la configuration d'un GPR et permettre son optimisation numérique en prenant compte la sensibilité du dispositif, la longueur d'onde de résonance et le facteur de qualité de la cavité. Un module d'optimisation a été intégré à la plateforme afin de comparer des configurations complexes. Tous les jeux de données intermédiaires et scripts suivent les principes *Findable*, *Accessible*, *Interoperable*, *Reusable* (FAIR), garantissant la reproductibilité et guidant les expérimentateurs vers des biocapteurs GPR ultra-compacts et haute performance.

5. Remerciements

Les auteurs remercient l'ensemble du consortium du projet ANR-23-CE09-0014 (SWAG-P).

6. Bibliographie

- [1] Špačková et al., IEEE, 2016
- [2] Moreau et al., Nature, 2012

Métasurface à modulation temporelle pour des applications antennaires

M.Coumbassa¹, B.Ratni¹, T. Lepetit², S. N. Burokur¹

¹ : LEME, Univ Paris Nanterre, 92410 Ville d'Avray, France,

² : ONERA, DEMR, Université Paris-Saclay, F91123 Palaiseau, France

c.mabinty@parisnanterre.fr

Résumé

Ce travail explore l'utilisation de la modulation temporelle appliquée aux métasurfaces à codage binaire pour contrôler la répartition spectrale des ondes réfléchies. En reliant directement la séquence de modulation aux harmoniques générés, nous mettons en évidence le rôle déterminant de la séquence de codage dans l'annulation ou la pondération des harmoniques. Ces résultats ouvrent des perspectives pour des applications en communications 5G/6G ou en radar.

1. Introduction

Les métasurfaces, constituées d'éléments sub-longueur d'onde, ont profondément transformé la façon de contrôler les ondes électromagnétiques [1]. Initialement passives, ces surfaces ont rapidement évolué, par l'intégration de composants actifs, vers des versions reconfigurables [2], permettant un contrôle dynamique à la fois spatial et temporel des ondes [1]. La modulation temporelle permet ainsi de briser l'invariance temporelle des systèmes, offrant la possibilité de manipuler la fréquence en générant, annulant ou pondérant sélectivement certaines harmoniques du champ électromagnétique réfléchi ou transmis. Ces avancées permettent aux métasurfaces de réaliser des fonctions avancées telles que la conversion de fréquence [3], ou la génération d'harmoniques [4], tout en conservant une architecture compacte et plus simple que celle des systèmes de réseaux d'antennes.

2. Modulation temporelle appliquée aux métasurfaces à codage binaire

La modulation temporelle appliquée aux métasurfaces constitue aujourd'hui une approche prometteuse pour le contrôle dynamique des ondes électromagnétiques. Le principe repose sur l'application d'un signal de modulation global, noté $\Gamma(t)$, à l'ensemble des cellules unitaires de la surface. Dans le cas d'un codage binaire, chaque cellule peut alterner entre deux états distincts (par exemple deux valeurs de phase ou d'amplitude), ce qui permet de définir une séquence temporelle périodique de longueur L et de période élémentaire τ . Le signal de modulation s'écrit alors :

$$\Gamma(t) = \sum_{n=1}^L \Gamma^n U^n(t), \quad \Gamma^n \in \{-1, +1\}$$

Où $U^n(t)$ est une impulsion unité active sur l'intervalle $[(n-1)\tau, n\tau]$. La séquence des coefficients $\{\Gamma^n\}_{n=1}^L$ joue un rôle fondamental puisqu'elle détermine le spectre réfléchi ou transmis par la métasurface. En effet, la décomposition en série de Fourier de $\Gamma(t)$ conduit aux coefficients spectraux définis comme suit :

$$a^m = \sum_{n=1}^L \Gamma^n \text{sinc}\left(\frac{m}{L}\right) e^{-j \frac{\pi m}{L}(2n-1)}$$

qui gouvernent l'amplitude et la phase des différentes harmoniques générées autour de la fréquence porteuse. La répartition spectrale de l'énergie dépend directement de la séquence de codage : une séquence équilibrée génère des harmoniques bien définis, tandis qu'une séquence pseudo-aléatoire diffuse l'énergie sur une large bande.

3. Résultats de simulation

La métasurface étudiée à $f = 5$ GHz est constituée d'un réseau de 8×8 cellules unitaires (Figure 1a), chacune de périodicité $dx = dy = 30$ mm soit l'équivalent de $\lambda/2$. Elle est modulée temporellement à la

fréquence $f_m = 100$ MHz avec la séquence des coefficients $\{\Gamma^n\} = [1, 1, -1, -1]$ correspondant à une séquence de codage de taille $L = 4$ avec un séquençement 0011, comme illustré sur la Figure 1b.

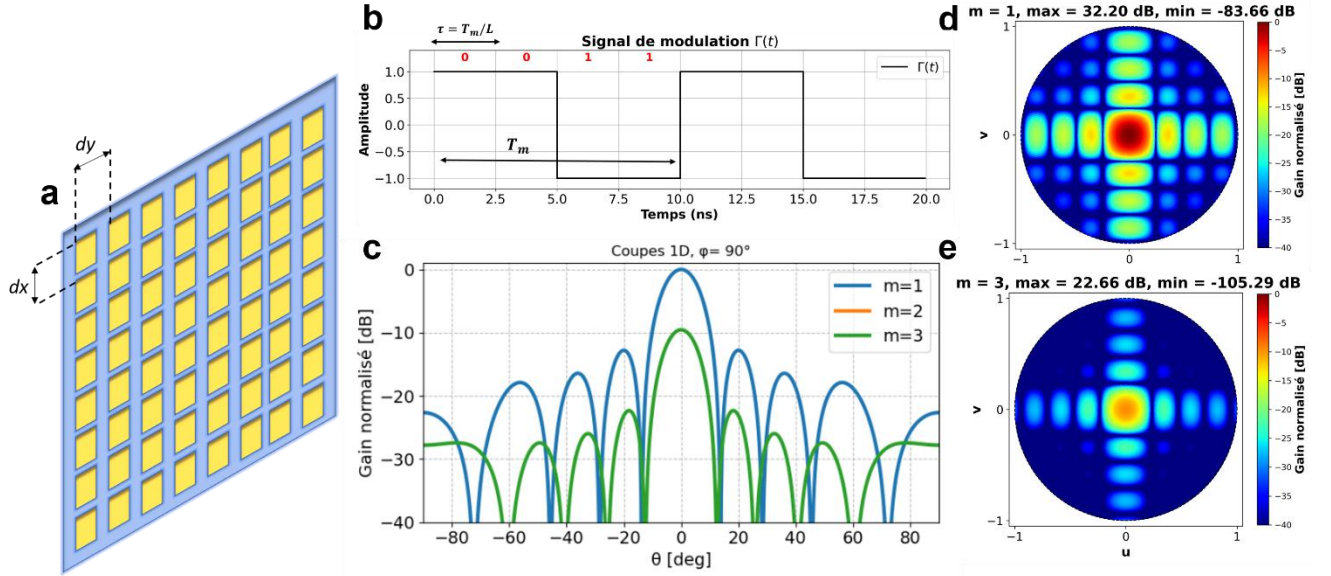


Figure 1: **a, b** Métasurface simulé et signal de modulation appliqué. **c** Champ réfléchi pour les harmoniques 1 à 3. **d, e** Diagramme 2D du champ réfléchi respectivement pour les harmoniques 1 et 3.

Une première analyse du spectre réfléchi met en évidence que cette séquence de codage annule systématiquement les harmoniques d'ordre pair, en accord avec la symétrie de séquence de modulation temporelle adoptée. En revanche, les harmoniques impairs subsistent, avec une puissance décroissante lorsque l'ordre augmente. Plus précisément, le premier harmonique ($m = 1$) atteint un maximum d'environ 32.2 dB tandis que l'harmonique d'ordre trois ($m = 3$) est significativement atténué avec un maximum d'environ 22.7 dB (Figure 1c-e). Cette décroissance met en évidence une redistribution sélective de l'énergie vers les basses harmoniques, caractéristique des séquences binaires équilibrées.

4. Conclusion

Nous avons présenté une métasurface modulée temporellement et montré que la séquence de modulation détermine la répartition spectrale de l'énergie réfléchi, en contrôlant l'annulation et la pondération des harmoniques. Une perspective intéressante réside dans l'exploitation du degré de liberté spatial offert par les métasurfaces reconfigurables, puisque la combinaison des variations temporelles et spatiales permet de maîtriser simultanément le spectre et la direction de rayonnement.

6. Bibliographie

- [1] L. Zhang *et al.*, « Space-time-coding digital metasurfaces », *Nat. Commun.*, vol. 9, n° 1, p. 4334, 2018, doi: 10.1038/s41467-018-06802-0.
- [2] R. Feng, B. Ratni, J. Yi, H. Zhang, A. de Lustrac, S. N. Burokur, « Versatile metasurface platform for electromagnetic wave tailoring », *Photon. Res.*, vol. 9, n° 9, p. 1650, 2021, doi: 10.1364/PRJ.428853.
- [3] T. Lopez, T. Lepetit, B. Ratni, S. N. Burokur, « Metasurface doppler cloak for broadband radar stealth », *Adv. Phys. Res.*, p. e00064, 2025, doi: 10.1002/apxr.202500064.
- [4] Y. Wang, A. Tennant, « Experimental time-modulated reflector array », *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 62, n° 12, p. 6533-6536, 2014, doi: 10.1109/TAP.2014.2362129.

Dipole Radiation in Dispersive and Lossy Photonic Time Crystals

Thomas F. Allard, Jaime E. Sustaeta-Osuna, Francisco J. García-Vidal, Paloma A. Huidobro
Departamento de Física Teórica de la Materia Condensada and Condensed Matter Physics Center
(IFIMAC), Universidad Autónoma de Madrid, E-28049 Madrid, Spain
thomas.allard@uam.es

Abstract

A sudden change in a material refractive index – a time interface – induces a frequency conversion process accompanied by both forward and backward propagating waves, a phenomenon termed time refraction and reflection. Building on this temporal effect, a myriad of new physical phenomena with no counterpart in static systems has been unraveled, leading to the field of time-varying media [1]. Within this field, materials whose electric permittivity is modulated periodically in time, termed photonic time crystals (PTCs), have attracted considerable attention for their ability to open momentum bandgaps hosting amplifying modes [2]. These momentum gaps, however, generally appear only at the system's parametric resonance condition which constrain many features derived from amplification to a narrow frequency band. Moreover, they are accompanied by exceptional points (EPs) that render their analysis more intricate.

Here, we show that a careful consideration of dispersion and absorption can overcome these issues. By investigating the dissipated power of a point-dipole embedded in a dispersive and lossy PTC, we unveil that temporal modulation enables gain in broadband frequency windows free of EPs. This gain is characterized by a negative value of the steady state power dissipated by the dipole, a phenomenon whose quantum counterpart has been associated to spontaneous excitation [3]. We demonstrate that this effect is general and occurs from weak modulation strengths to low modulation frequencies, and can be achieved for various material platforms.

Acknowledgments

We acknowledge funding from the European Union through the ERC grant TIMELIGHT under GA 101115792, and from the Spanish Ministry for Science, Innovation, and Universities – Agencia Estatal de Investigación (AEI) through Grants No. PID2022-141036NA-I00, PID2021-125894NB-I00, No. CEX2018-000805-M (through the María de Maeztu program for Units of Excellence in Research and Developments) and Grant No. RYC2021-031568-I (Ramón y Cajal program). JES also acknowledges support from the CAM Consejería de Educación, Ciencia y Universidades, Viceconsejería de Universidades, Investigación y Ciencia, Dirección General de Investigación e Innovación Tecnológica (CAM FPI grant Ref. A281).

Bibliography

- [1] Photonics of time varying media, Emanuele Galiffi, Romain Tirole, Shixiong Yin, Huanan Lia, Stefano Vezzoli, Paloma A. Huidobro, Mario G. Silveirinha, Riccardo Sapienza, Andrea Alu, and J.B. Pendry, *Adv. Photonics*, 4(1), 014002, 2022.
- [2] Theory and applications of photonic time crystals: a tutorial, Mohammad M. Asgari, Puneet Garg, Xuchen Wang, Mohammad S. Mirmoosa, Carsten Rockstuhl, and Viktor Asadchy, *Adv. Opt. Photonics* 16, 4, 958-1063, 2024.
- [3] Spontaneous Emission Decay and Excitation in Photonic Time Crystals, Jagang Park, Kyungmin Lee, Ruoyang Zhang, Hee-Chul Park, Jung-Wan Ryu, Gil Young Cho, Min Yeul Lee, Zhaoqing Zhang, Namkyoo Park, Wonju Jeon, Jonghwa Shin, C. T. Chan, and Bumki Min, *Phys. Rev. Lett.*, 135, 133801, 2025.

Computation of optical properties of soot nanoparticles: transitioning between an atomistic model and a surface integral equations methods

N. Brosseau-Habert^{1,2}, P. Mavrikakis³, S. Picaud², O. Martin³, M. Devel¹

¹ : Institut FEMTO-ST, UMLP, SUPMICROTECH, CNRS, UTBM

² : Institut UTINAM, UMLP, CNRS

³ : NAM, EPFL

nicolas.brosseau-habert@umlp.fr

Abstract

We present a multiscale framework to compute the UV-visible optical properties of soot nanoparticles by bridging an atomistic Dynamic Atomic Dipole Interactions (DADI) model with a continuum Surface Integral Equations (SIE) solver. In our approach, DADI yields frequency-dependent effective refractive indices via Rayleigh-Debye-Gans inversion, which are then supplied to SIE to handle larger geometries consistently with the atomistic description.

1. Introduction

The simulation of electromagnetic interactions in extremely small-scale and complex structures is crucial for advancing our understanding in various scientific and engineering fields such as photonics, nanotechnology, biology, and atmospheric sciences. Soot nanoparticles emitted by combustion represent an important topic in this last field of study. Indeed, modeling their interaction with light is mandatory to understand their influence on radiative forcing of the atmosphere and to characterize their physico-chemical structure *in situ*. We present here two methods that provide a robust framework for modeling these interactions: The SIE (Surface Integral Equation) continuum method and the DADI (Dynamic Atomic Dipole Interactions) atomistic method and how they can cooperate in a multi-scale approach.

2. Description of the methods

While, being an atomistic method, DADI requires the knowledge of the frequency-dependent atomic polarizabilities and the position of every atoms forming a soot nanoparticle [1], SIE being a finite element version of the surface integral solution of the macroscopic Maxwell equations needs a frequency-dependent optical index for each type of material and the description of the surface(s) of the system, which is shifted by 1.18 Å with respect to the nuclei position used in DADI. Note that the T-PMCHWT (Poggio, Miller, Chang, Harrington, Wu, and Tsai) formulation of SIE [2] is used for this work. Figure 1 shows a primary soot nanoparticles model at the atomistic scale and as a continuum for SIE. The optical index for a given soot nanoparticle is computed at the atomistic scale with DADI in the Rayleigh Debye Gans approximation [3] and later used by SIE to deal with bigger systems out of reach of DADI.

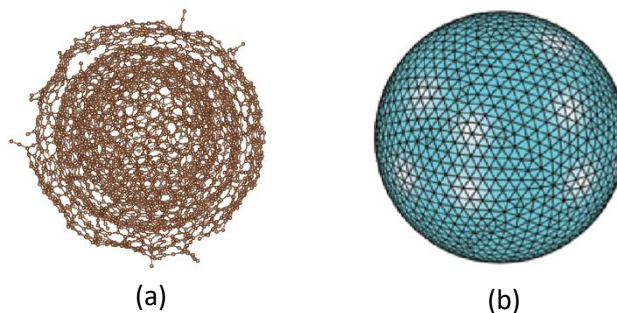


Figure 1: model of a primary soot nanoparticles (a) at the atomistic scale (b) as a continuum for SIE

3. Results

In this work, we compared absorption and scattering cross sections calculated with DADI and SIE for one isolated primary soot nanoparticles, as well as for two primary soot nanoparticles separated, in contact or interpenetrated. For isolated spherules, DADI and SIE perfectly agree across the UV–visible and both match T-Matrix, thus validating our method to compute the optical index at the atomistic scale for this system.

For two identical separated spherules, mass absorption cross sections (MAC) are unchanged for a separation of 50 Å (normal since it is an intensive quantity), while at 39.4 Å small, localized near-UV deviations emerge (e.g., at 225 nm: 2% higher MAC with SIE), growing modestly at contact (~2.5%). In the visible, both methods remain consistent and within literature ranges; at 550 nm for two spherules in contact, MAC is $6.62 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ (DADI) vs $6.90 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ (SIE).

For interpenetrated spherules (Figure 2), both methods show a ~5 nm red-shift and ~7% peak-height reduction; at 550 nm SIE exceeds DADI by ~11%.

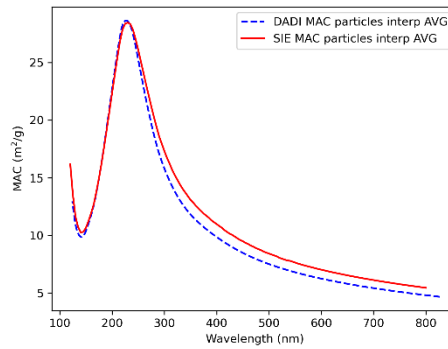


Figure 2: MAC calculated for a system of two interpenetrated with DADI (blue dashed line) and SIE (red solid line)

4. Conclusion

A DADI→SIE pipeline (thanks to the sharing of optical indices and outer surface of the system) yields consistent, quantitative optical properties from single spherules to small aggregates. Residual differences—most evident near the first UV peak and in the visible for interpenetration—likely reflect geometric surrogates and the use of spatially averaged, rather than spatially varying, indices. Extending SIE with position-dependent refractive indices around coalescence zones could be a promising route to further improve the agreement between the two methods.

5. Acknowledgments

The authors want to thank SMYLE Collegium within which the collaboration between Institut FEMTO-ST and NAM laboratory of EPFL was able to emerge and develop.

6. Bibliography

- [1] Kern, A. M. and O. J. F. Martin, “Surface integral formulation for 3D simulations of plasmonic and high permittivity nanostructures,” *J. Opt. Soc. Am. A*, **Vol. 26**, No. 4, 732–740, 2009.
- [2] Brosseau-Habert, N. et al., “The reverse-DADI method: Computation of frequency-dependent atomic polarizabilities for carbon and hydrogen atoms in hydrocarbon structures,” *JQSRT*, **329**, 109194, 2024.
- [3] Brosseau-Habert, N. et al., “Changes of optical properties of two carbonaceous nanoparticles upon their coalescence: Computations at the atomistic level,” *JQSRT*, **346**, 109592, 2025.

C. Demullier^{1,3}, Y. Pennec¹, B. Djafari Rouhani¹, C. Calmettes², F. Salaün³

¹ : Univ. Lille, CNRS, UMR 8520 – IEMN – Institut d'Electronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie, Lille, France,

² : Agence Innovation Défense, 60 boulevard Général-Martial-Valin, 75015 Oaris, France

³ : Univ. Lille, ENSAIT, ULR 2461 – GEMTEX – Génie et Matériaux Textiles, Lille, France
charlotte.demullier@univ-lille.fr

Avec le développement rapide des technologies et capteurs infrarouges, les matériaux et techniques de détection militaires évoluent constamment, menaçant la discrétion des soldats, équipements et installations. Les exigences de camouflage infrarouge deviennent ainsi plus complexes. Il est urgent de développer des dispositifs de camouflage adaptés, et une solution avancée repose sur la conception de matériaux textile infrarouges capables de réduire l'écart d'émission entre la cible et l'arrière-plan, diminuant ainsi les risques de détection et améliorant la survivabilité du combattant. Dans ce contexte, nous proposons d'utiliser les propriétés remarquables des cristaux photoniques afin de modifier le spectre de transmission des ondes électromagnétiques issues du corps humain. L'ajustement des propriétés géométriques et physiques des filaments composant la fibre textile permettra de contrôler l'émissivité globale du matériau et de réduire la différence de rayonnement infrarouge entre le textile photonique porté et l'arrière-plan afin de réaliser, in fine, le camouflage infrarouge.

Le fil textile étudié est composé de filaments de polyéthylène haute densité (HDPE) organisés selon un réseau hexagonal (figure 1.a). Dans cette représentation schématique, l'onde électromagnétique issue du corps humain est envoyée face au fil structuré. La détection est réalisée après le fil, conduisant au spectre de transmission. La figure 1.b reporte les courbes de transmission ainsi obtenues dans le domaine de fréquence [8-15] μm pour des facteurs de remplissage de 8%, 44% et 84%. Considérant un paramètre de maille de $a = 5 \mu\text{m}$, les diamètres des fils correspondant sont $D = 1.5 \mu\text{m}$; $3.4 \mu\text{m}$ et $4.8 \mu\text{m}$. Nous observons un creux de transmission à $13.8 \mu\text{m}$, dont la fréquence est indépendante du diamètre. Ce creux de transmission est associé à l'absorption du polyéthylène, qui devient de plus en plus profond au fur et à mesure que le diamètre augmente, en bonne adéquation avec l'augmentation de la quantité de matière. En parallèle, le spectre de transmission présente, à basse longueur d'onde, une bande interdite dont la fréquence centrale se décale vers les grandes longueurs d'onde avec le facteur de remplissage, à savoir $9 \mu\text{m}$ à 8%, $10.7 \mu\text{m}$ à 44% et $12.8 \mu\text{m}$ à 84%. Cette bande interdite est directement reliée à la géométrie de la fibre photonique permettant de moduler la transmission sur la gamme de fréquence considérée. Nous montrons que, à partir des lois de Planck et de Kirchhoff, il devient possible de moduler l'émissivité du corps humain à l'aide du textile photonique.

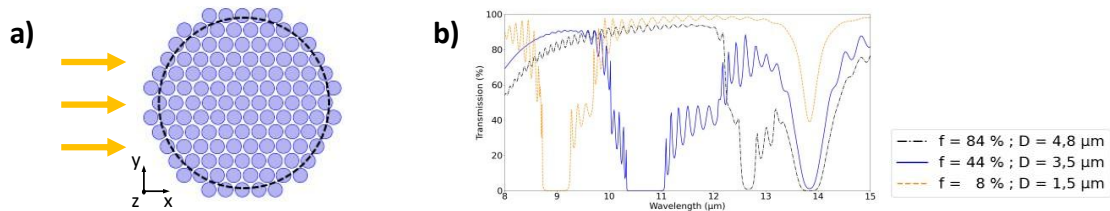


Figure 1. (a) Modèle du fil textile photonique composée de microfilaments. (b) Courbes de transmission d'un signal EM dépolarisé pour 3 facteurs de remplissage considérant 28 cellules unitaires dans la direction ΓM de la direction de la zone de Brillouin.

Affiche GT2

Controlling heat capacity in a thermal concentrator using metamaterials: numerical and experimental studies

T. Arepolage¹, C. Verdy², T. Sylvestre¹, A. Leray³, S. Euphrasie¹

¹ : Université Marie et Louis Pasteur, CNRS, Institut FEMTO-ST, Besançon, France

² : Université Marie et Louis Pasteur, CNRS, UTBM, laboratoire ICB, Belfort, France

³ : Université de Bourgogne Europe, CNRS, laboratoire ICB, Dijon, France

Sebastien.euphrasie@femto-st.fr

Résumé

Nous présentons la conception et la caractérisation expérimentale d'un concentrateur thermique prenant en compte à la fois le tenseur anisotrope de la conductivité thermique obtenu par transformation de coordonnées mais aussi le produit densité - capacité thermique.

1. Introduction

Les métamatériaux sont des composites qui permettent d'obtenir des propriétés que l'on ne retrouve généralement pas naturellement. Ces dernières années, des métamatériaux thermiques ont permis de manipuler les flux thermiques afin d'obtenir des fonctions de camouflage, de concentration, d'illusions ou de capteurs. Lorsque leur conception utilise les transformations de coordonnées, le tenseur de la conductivité thermique K devient anisotrope et le produit densité-capacité calorifique ρC_p peut varier localement. Les réalisations se concentrent généralement sur K et ne tiennent pas compte de ρC_p . Nous présentons ici deux concentrateurs (« 2D » et « 3D ») tenant compte à la fois de K et de ρC_p . La version « 3D » a été fabriquée par impression 3D métallique et caractérisée.

2. Conception

La technique de transformation de coordonnées a été utilisée pour transformer un anneau isotrope en un anneau anisotrope avec un rayon interne plus petit afin de concentrer le flux thermique, sans perturber le flux à l'extérieur de l'anneau. Le matériau ainsi obtenu possède une conductivité K anisotrope et un produit densité-capacité calorifique ρC_p variant localement. Il est approximé localement par des cellules élémentaires de matériau isotrope structuré. La figure 1 montre le design pour la version « 2D » du concentrateur. Afin d'augmenter la capacité volumique ρC_p obtenu par homogénéisation d'une cellule telle que l'on peut la trouver dans la littérature, du métal (conducteur) plus dense que l'air (isolant) est ajouté à l'intérieur des zones isolantes. Cet ajout de métal est raccordé au reste de la structure par des ponts afin d'augmenter la masse à chauffer en ne modifiant que légèrement le tenseur K obtenu par homogénéisation. Cette variation est prise en compte pour ajuster les paramètres géométriques.

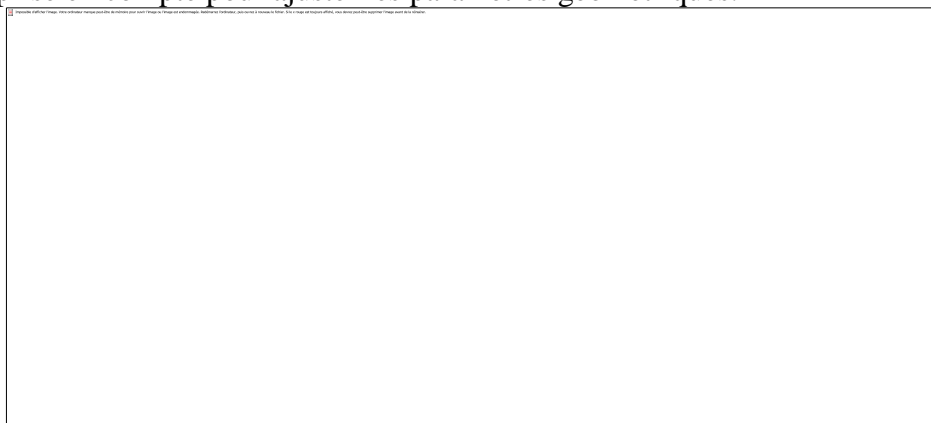


Figure 1. (a) Design du concentrateur thermique « 2D ». (b) Cellule du matériau entourant le concentrateur. (c) Cellule du matériau constituant le concentrateur

Dans le cas du composant « 3D », le flux thermique est toujours majoritairement dans le plan. Le métal ajouté pour augmenter ρC_p est cette fois-ci disposé sur le dessus du métal existant mais ne touchant pas le métal ajouté d'une autre cellule afin de peu modifier la conductivité thermique obtenu par homogénéisation. Les paramètres géométriques définitifs tiennent compte de cette modification pour obtenir le tenseur K désiré. La figure 2 montre le dispositif réalisé par impression 3D de cuivre.

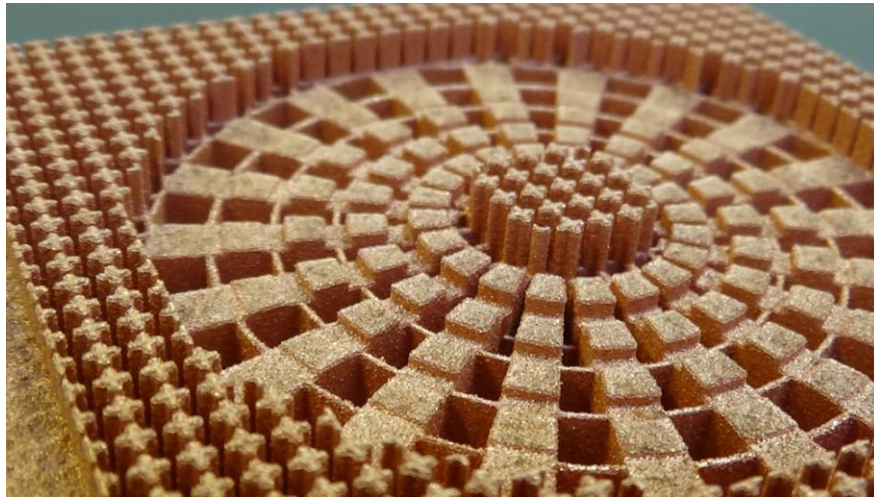


Figure 2. Photographie du concentrateur « 3D » réalisé par impression 3D de cuivre. Le rayon externe du concentrateur est de 24 mm.

3. Résultats

Des mesures ont été réalisées avec une caméra thermique. Un bord du dispositif a été relié thermiquement à un bain d'eau glacé et l'autre à un bain d'eau chaude régulé. Les mesures temporelles et statiques ont été comparées à des simulation par éléments finis et correspondent très bien. L'évolution temporelle est plus proche d'un concentrateur idéal comparé à un concentrateur ne prenant pas en compte ρC_p .

4. Conclusion

Dans cette contribution, nous avons montré deux possibilités pour concevoir des métamatériaux thermiques tenant compte à la fois du tenseur anisotrope K et de ρC_p . Ces procédés peuvent être appliqués aussi à des capes de camouflage ou autre dispositifs thermiques où l'on désire le flux extérieur non perturbé, y compris en dynamique ou transitoire.

5. Remerciements

Ce travail a été supporté par la Graduate School EIPHI (ANR-17-EURE-0002), le programme d'investissements d'avenir ISITE-BFC (ANR-15-IDEX-0003). Les auteurs remercient le réseau académique français RENATECH ainsi que Julio Andrés Iglesias Martinez.

6. Bibliographie

[1] Arepolage T. *et al.*, Controlling heat capacity in a thermal concentrator using metamaterials: Numerical and experimental studies, *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. **220**, pp 124909, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124909>

Matériaux à changement de phase pour la photonique sur silicium programmable.

C. Pourny¹, A. Rogemont¹, Y. Brûlé², A. Albanese², R. Sawant¹, J.B Jager³, B. Charbonnier², A. Coillet¹, P. Noé² et B. Cluzel¹

1 : Université de Bourgogne Europe, Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne, UMR CNRS
6303, F-21078 Dijon, France,

2 : Université Grenoble Alpes, CEA, LETI, F-38000 Grenoble, France

3 : Université Grenoble Alpes, CEA, Grenoble INP IRIG, PHELIQS Grenoble F-38000, France

charles.pourny@u-bourgogne.fr

Résumé

Nous présentons les résultats obtenus lors de la programmation de différents matériaux à changement de phase (cycles typiques, tests d'endurance, etc.) tout en soulignant leurs applications potentielles. L'intérêt réside également dans la technique de caractérisation optique (interférométrie hétérodyne), développée au sein de notre équipe.

1. Introduction

Grâce à un ensemble unique de propriétés optiques, électroniques et structurales, les matériaux chalcogénures ont été utilisés dans un large éventail d'applications, des dispositifs de mémoire non volatile à la photonique non linéaire dans l'infrarouge (IR) et à l'informatique optique. La demande croissante de dispositifs photoniques programmables a permis aux matériaux à changement de phase (PCM) de s'imposer comme des matériaux attrayants, grâce à leur capacité à modifier leurs propriétés optiques à volonté [1]. Les PCMs offrent un large contraste de propriétés optiques, résultant d'une transition de phase amorphe à cristalline réversible et non volatile, et peuvent donc être intégrés en tant que milieu accordable dans divers dispositifs optiques.

2. Description de la structure étudiée et résultats

Dans ce cadre, notre objectif est de contrôler expérimentalement le changement de phase des PCMs et d'en mesurer l'impact sur les propriétés optiques. Dans ce travail, nous mesurons les énergies typiques nécessaires à l'amorphisation et à la cristallisation de deux PCMs, le $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST225) et le $\text{GeSe}_{0.2}\text{Te}_{0.8}$ (GST40). Le déphasage et la transmission optique de ces dispositifs sont mesurés par interférométrie hétérodyne [2] tandis que la puissance et la durée des impulsions laser d'amorphisation/cristallisation sont augmentées, jusqu'au changement de phase. Leur endurance est également testée et la programmation d'états intermédiaires réalisée. Enfin, une étude chimique et structurale (images MEB, cartographies EDX) est menée grâce aux équipements du CEA Leti à Grenoble afin de mieux comprendre les mécanismes physiques menant à la détérioration des PCMs. Ces résultats expérimentaux sont également comparés à des simulations réalisées sur COMSOL multiphysics® qui nous permettent d'affiner notre compréhension des phénomènes physiques mis en jeu.

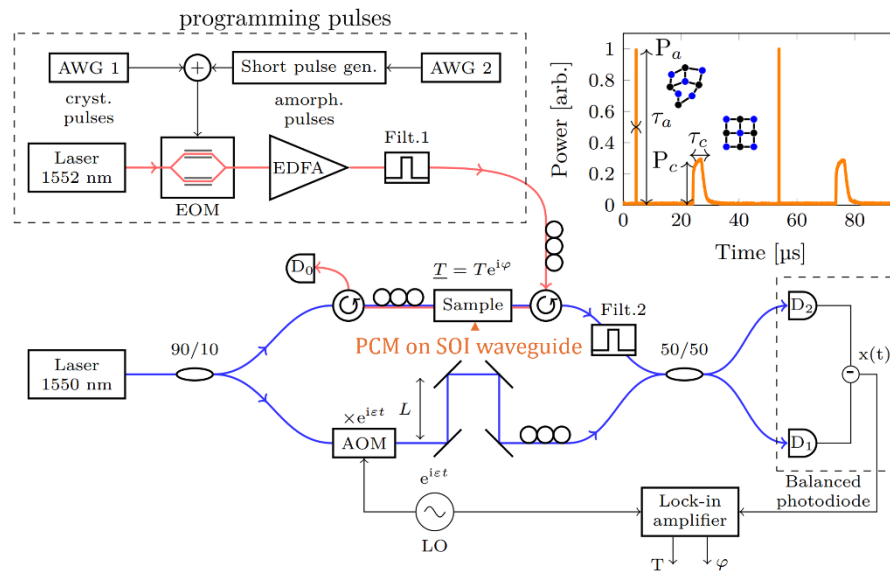


Figure 1. Génération des impulsions de programmation (en haut à gauche). Une séquence d'impulsions d'amorphisation et de cristallisation provenant du dispositif de génération d'impulsions (en haut à droite). Interféromètre hétérodyne pour détecter la transmission et le changement de phase optique (en bas).

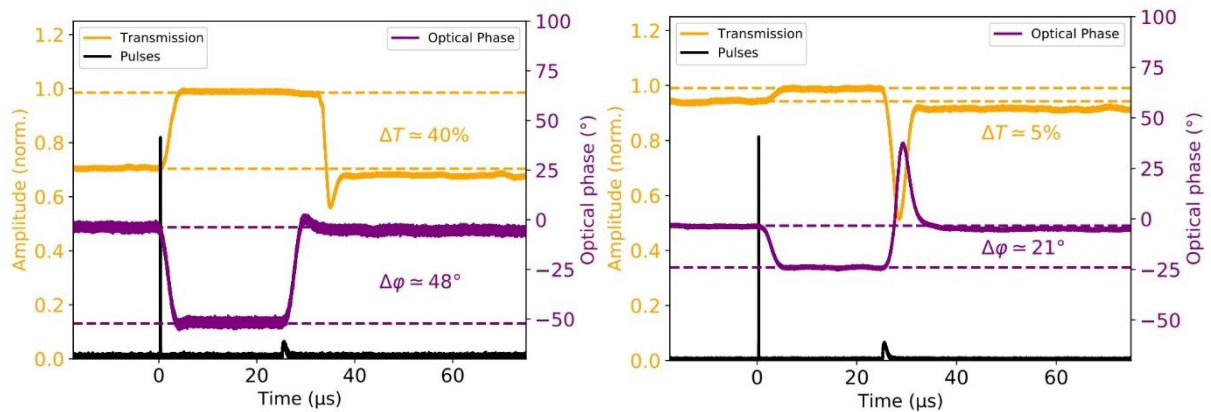


Figure 2. Transmission et changement de phase optique enregistrés lors de l'exposition à des impulsions de programmation, c'est-à-dire des impulsions d'amorphisation (set) et de cristallisation (reset). (a) GST40. (b) GST225.

3. Conclusion

Dans cette contribution, nous avons notamment mis en évidence le caractère déphaseur du GST40, qui est une propriété très recherchée pour un vaste panel d'applications [3]. La simulation numérique multiphysique ouvre également les portes à une compréhension plus fine de ce qui se passe lors de la programmation de nos patchs. Le résultat des études réalisées au CEA (MEB, MET, EDX, coupes FIB, etc.) nous permet d'élaborer et sélectionner des hypothèses de plus en plus plausibles afin d'expliquer l'endurance de nos matériaux ainsi que l'uniformité de la programmation.

4. Remerciements

Les auteurs remercient l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) pour son financement dans le cadre du projet OCTANE (convention de subvention ANR-20-CE24-0019). Ils remercient également le groupe de recherche français « GdR CHALCO » (<https://gdrchalco.cnrs.fr/>). Ce travail a été soutenu en partie dans le cadre du projet NEUROPULS financé par le programme de recherche et d'innovation Horizon Europe de l'Union européenne sous le numéro de convention de subvention 101070238. Tous les tests optiques ont été réalisés dans les installations de la plateforme SMARTLIGHT financée par l'Agence Nationale de la Recherche (contrat EQUIPEX+ « ANR-21-ESRE-0040 ») et la Région Bourgogne-Franche-Comté.

5. Bibliographie

- [1] C.Ríos et al. (2015). *Integrated all-photonic non-volatile multi-level memory*. Nature Photonics. 9. 725-732. 10.1038/nphoton.2015.182.
- [2] Ibnoussina M et al. “*Heterodyne interferometry applied to the characterization of nonlinear integrated waveguides*”. Opt Lett. 2020 Sep 15;45(18):5053-5056.
- [3] Pierre Noé, Bart J. Kooi, and Matthias Wuttig. *Phase-change and ovonic materials* (fifth edition). physica status solidi (RRL) – Rapid Research Letters, 18(10) :2400239, 2024.

Résonances dans les cristaux photoniques 1D bicouches twistés

M. Lavignac, H. S. Nguyen, C. Chevalier, X. Letartre, S. Callard, L. Ferrier
 Institut des nanotechnologies de Lyon
marion.lavignac@ec-lyon.fr

Résumé

Nous présentons les résultats de notre étude des différents types de résonances dans les moirés photoniques 1D twistés. Nous nous intéressons à la localisation, au profil des modes, à leur réponse en polarisation, et à leur dépendance avec l'angle de twist. Nous avons développé un modèle analytique qui permet de mieux comprendre les différents couplages et interactions des modes dans cette structure, en bon accord avec les simulations numériques et les premières mesures expérimentales.

1. Introduction

Les moirés photoniques sont des structures obtenues par superposition de deux cristaux photoniques membranaires (CP) avec un léger décalage, qui peut être latéral, angulaire, ou de périodicité. Les structures bicouches présentent des propriétés particulières par rapport aux CP monocouches. L'espacement inter-couches et le décalage offrent de nouveaux degrés de liberté permettant d'accorder les résonances [1], ouvrant ainsi la voie à la réalisation de micro-capteurs accordables et reconfigurables. La nature chirale de certaines configurations de moiré, conduit à des réponses sélectives en polarisation [2]. Enfin, des bandes plates, caractérisées par une forte densité d'états et de forts facteurs de qualité, ont été observées en simulation [3, 4] et expérimentalement [5, 6] dans ces structures, les rendant particulièrement intéressantes pour leur couplage avec des émetteurs. Cependant, les études sur les moirés photoniques bicouches restent pour la plupart théoriques, car ces structures, exigeant une maîtrise fine de l'alignement, sont difficiles à fabriquer. De plus, leur complexité 3D et la cohabitation des différentes échelles de périodicité rendent les simulations numériques lourdes, d'où l'intérêt de développer des modèles analytiques pour comprendre l'impact des paramètres sur les modes.

Dans cette étude, nous nous intéressons aux moirés 1D twistés, formés par la superposition de deux réseaux 1D avec un décalage angulaire. Afin de mettre en évidence l'évolution des modes optiques dans ces structures avec l'angle de twist, nous avons développé un modèle analytique basé sur le couplage de modes guidés. La réponse en polarisation est également étudiée, la structure étant intrinsèquement chirale. Enfin de premiers échantillons ont été fabriqués pour démontrer expérimentalement les effets observés théoriquement.

2. Description de la structure étudiée

La structure du moiré 1D twisté est représentée en Figure 1. Elle est constituée de deux réseaux 1D en silicium amorphe ($a=300\text{nm}$) décalés angulairement d'un angle 2θ .

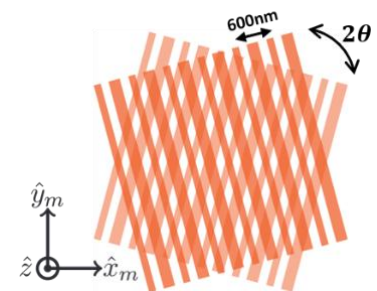


Figure 1 : Géométrie du moiré 1D twisté.

3. Résultats

Dans la figure 2, nous présentons le diagramme de bandes en absorption (simulations RCWA) d'une structure moiré 1D twisté (de 50° et 46°), ainsi que la superposition avec le modèle analytique (en orange). On peut identifier deux types de résonances, celles de moiré (en bleu) et celles des simple-couches (en blanc). Le modèle analytique

que nous avons développé permet de suivre l'évolution des modes en fonction de l'angle de twist et de comprendre leur couplage, tout en s'affranchissant de simulations numériques gourmandes en ressources pour ces structures complexes.

Les premiers résultats expérimentaux sont présentés en Figure 3. Les deux CP ont bien été alignés avec un décalage angulaire maîtrisé (fig.3(a)), et les mesures de réflectivité résolues en angle et longueur d'onde (fig.3(b)) font apparaître les bandes simple-couches (paraboles) et les bandes de moiré (surlignées en orange), comme prédit par les simulations numériques et le modèle. Les mesures sont en bon accord avec les simulations RCWA et le modèle analytique.

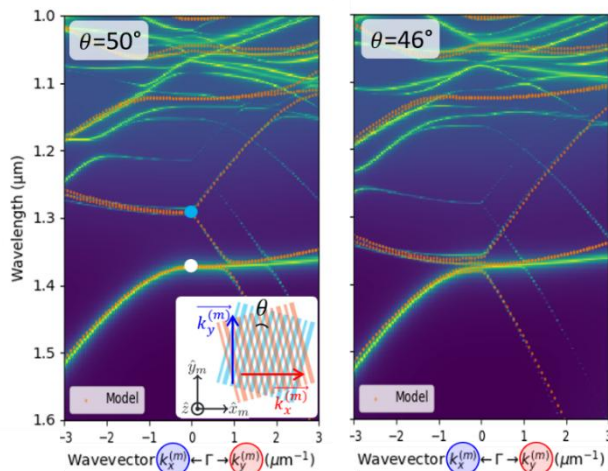


Figure 2 : Simulation RCWA (absorption, échelle log) et modèle (orange) pour un angle de 50° à gauche, et 46° à droite.

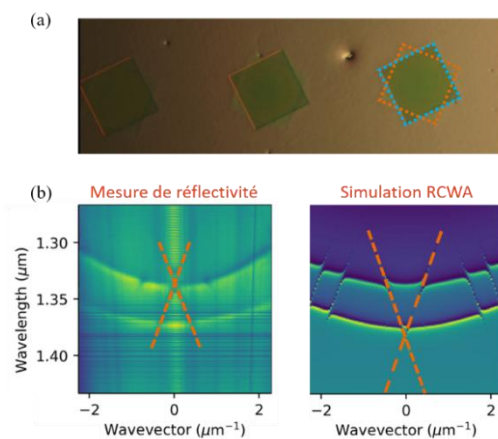


Figure 3 : Résultats expérimentaux (a) Echantillon (b) Mesure optique par spectroscopie de Fourier et simulation RCWA. Les bandes de moiré sont surlignées en orange.

4. Conclusion

Dans cette contribution, nous avons analysé les résonances d'un moiré photonique 1D twisté par la simulation, et reproduit analytiquement la dispersion et son évolution en fonction de l'angle de twist. Les premiers résultats expérimentaux permettent d'observer les deux types de bandes identifiées.

Par la suite, un nouvel échantillon sera fabriqué et caractérisé afin de mettre en évidence expérimentalement l'impact de l'angle de twist sur la réflectivité et la polarisation des modes, afin de confirmer les prédictions de la modélisation. Par ailleurs, l'exploration de structures actives serait une perspective intéressante pour l'étude de l'interaction entre les modes photoniques et des émetteurs.

5. Remerciements

Les auteurs remercient Aziz Benamrouche pour son aide en caractérisations, Benjamin Fornacciari pour la fabrication, Emmanuel Drouard et Mickael Escudero pour leur soutien technique en simulation.

6. Bibliographie

- [1] B. Lou et al., *Sci. Adv.*, déc. 2022, <https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.add4339>
- [2] O. Aftenieva et al., *Adv. Opt. Mater.*, févr. 2021, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adom.202001280>
- [3] H. Tang et al., *Appl. Phys. Lett.*, déc. 2022, <https://pubs.aip.org/apl/article/121/23/231702/2834769/On-chip-light-trapping-in-bilayer-moire-photonic>
- [4] D. X. Nguyen et al., *Phys. Rev. Res.*, vol. 4, n° 3, p. L032031, août 2022, <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevResearch.4.L032031>
- [5] Q. Jing et al., *Nano Lett.*, août 2025, <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.nanolett.5c00304>
- [6] C. Saadi et al., *Laser Photonics Rev.*, juin 2025, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/lpor.202501038>

Radio wave attenuation by a large-scale photonic crystal sculpture

David Röhlig¹, Vincent Laude¹, Ralf Zichner², Felix Thieme², Angela Thränhardt² and Thomas Blaudeck²

¹ : Université Marie et Louis Pasteur, FEMTO-ST Institute, 15B avenue des Montboucons, 25030, Besançon, France

² : Chemnitz University of Technology, Reichenhainer Straße 70, 09126, Chemnitz, Germany
david.rohlig@femto-st.fr

Abstract

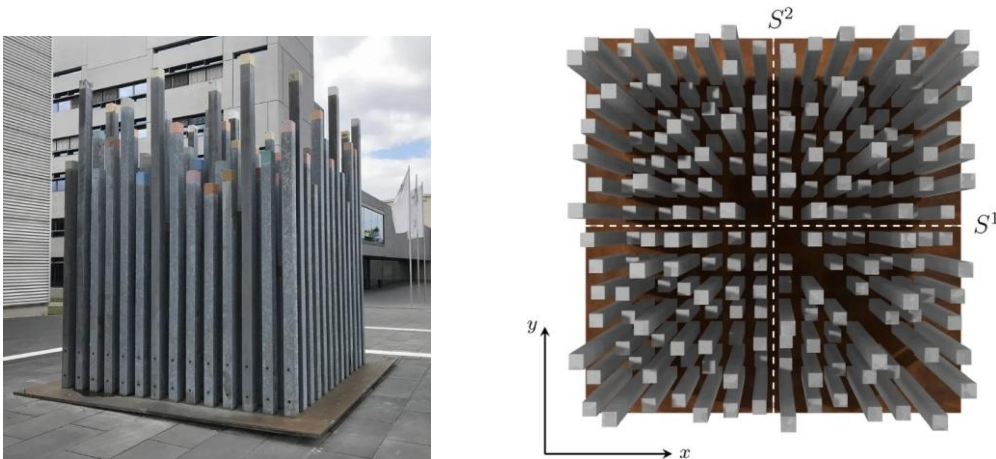
We recently presented an artwork that embodies the by far largest photonic crystal ever published, operating at radio frequencies [1]. We demonstrated both theoretically and experimentally the existence of band gaps. While photonic crystals are typically investigated on the nano and micro scale, the aim is to present not only a remarkable example of art with scientific relevance but also to highlight the potential for large-scale applications that have so far been underrated.

1. Introduction

We present an investigation of an unusual example of a two-dimensional metallic photonic crystal that far exceeds the scale of previously reported structures. Its periodicity is relevant to radio wave frequencies pertinent to network standards such as 4 or 5G.

2. Description of the studied structure

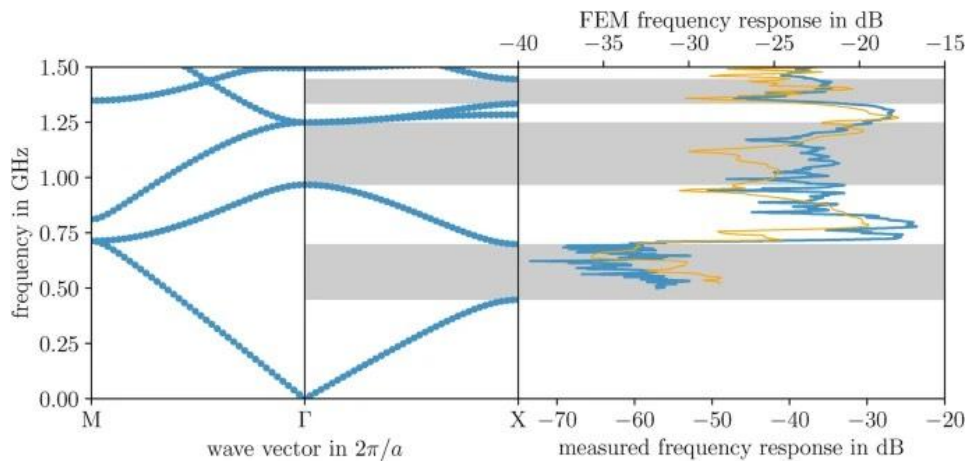
The structure under study is the artwork “Denk- und Wahrnehmungsmodell zum Phänomen der Farbe” (translated as “Thinking and Perception Model on the Phenomenon of Colour”) from 1998 created by artist Stefan Nestler and located in front of the central lecture hall of Chemnitz University of Technology. This piece of art consists of 187 periodically arranged hollow steel columns, standing upright and in parallel. More notably, the two-dimensional structure of the stelae formally satisfies the criteria of a finite photonic crystal and therefore joins the ranks of art with scientific relevance. Our objective is to adopt a cross-scale perspective on photonic crystals, further unraveling their potential



and application possibilities.

Figure 1. Artwork “Denk- und Wahrnehmungsmodell zum Phänomen der Farbe” by Stefan Nestler from 1998, consisting of 187 colored steel stelae (on the left). Visualization of the sculpture (generated with Blender [25](#)), viewed from above, consisting of a grid of steel stelae, with nine missing elements along one of the primary diagonals. Two measurement scenarios are indicated by dashed lines, corresponding to S1 and S2.

Figure 2. Theoretical band structure predictions for TM polarization, obtained using FEM on a triangular



mesh of P2 elements with a resolution of 25 nodes per lattice constant at both the external and internal boundaries, are compared both to the simulated and measured frequency response function of the stele artwork. The simulation cell features the same resolution as that used for the band structure calculation. Measurements were taken along the X path in reciprocal space under TM polarization, wherein the magnetic field is oriented perpendicular to the plane of periodicity.

3. Results

The transmission characteristics of the periodic stele artwork, analyzed as a function of frequency, are shown in Fig. 2 for TM modes. Overall, the experimental measurements reveal pronounced frequency-dependent variations of the response function, aligning well with the simulated FEM spectra. This is consistent with the anticipated activity of a photonic crystal, as represented by the band structure. We observe the occurrence of band gaps, within which waves cannot propagate due to the exclusive presence of evanescent solutions.

4. Conclusion

Art can indeed convey additional meanings beyond the artist's original intent. The sculpture by Stefan Nestler subjects radio waves to the principles of periodicity, which are confirmed by both photonic band structure and frequency response calculations that align well with the experiment. Our findings reveal that within the stele structure, there are frequency regions where electromagnetic wave propagation is confined to evanescent modes. With these results, we aim to draw attention to the potential of applying the concept of photonic crystals on scales much larger than those previously reported, thereby opening new avenues for specific applications in filtering, guiding, or localizing waves that fall within the telecommunications spectrum.

5. Acknowledgments

This work was partially funded by a Ph.D. scholarship awarded by the Free State of Saxony. Support by the TUCculture2025 initiative of Chemnitz University of Technology, by the EIPHI Graduate school (contract "ANR-17-EURE-0002") and by the Bourgogne-Franche-Comté Region is acknowledged.

6. Bibliography

[1] Röhlrig, D., Laude, V., Zichner, R. *et al.* Radio wave attenuation by a large-scale photonic crystal sculpture. *Sci Rep* **15**, 12317 (2025). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-95986-9>

Couleurs structurales de métasurfaces plasmoniques désordonnées : théorie et simulation

J. Hu¹, N. Destouches², K. Vynck¹

¹ : Université Claude Bernard Lyon 1, CNRS, Institut Lumière Matière, Villeurbanne, France

² : Université Jean Monnet, Institut d'Optique Graduate School, CNRS, Laboratoire Hubert Curien, Saint-Etienne, France
jialin.hu@univ-lyon1.fr

Résumé

Nous présentons un modèle théorique pour prédire les couleurs structurales observées en réflexion spéculaire de monocouches de nanoparticules métalliques intégrées dans des empilements de couches minces. Ce modèle repose sur l'approximation quasi-cristalline, qui prend en compte les corrélations spatiales entre particules dans le cadre de la diffusion multiple. Sa validité est confirmée par comparaison avec des calculs numériques rigoureux basés sur la méthode de la matrice T .

1. Introduction

Les métasurfaces désordonnées offrent une approche originale pour moduler la diffusion de la lumière, tant sur le plan spectral que directionnel [1]. En combinant des concepts issus de l'optique résonante et de la diffusion par des surfaces rugueuses, elles permettent d'obtenir une large palette de couleurs vives et stables, sans pigments, avec des applications possibles dans la conception de l'apparence visuelle [2] et l'anticontrafaçon [3]. Ces perspectives ont motivé le développement de nombreuses études théoriques et numériques visant à relier les paramètres des nanostructures à leur réponse optique et couleurs structurales.

Les méthodes numériques basées sur la matrice T offrent une description précise de la réponse optique d'ensembles de particules de tailles et de formes variables, mais leur coût en temps et en ressources limite leur applicabilité à de grands systèmes. Pour simplifier, on a souvent recours aux théories de milieu effectif, qui modélisent un milieu composite hétérogène comme un milieu homogène décrit par un tenseur de permittivité effective [4]. Cependant, ces modèles ne prennent pas en compte de manière rigoureuse l'interaction électromagnétique entre nanoparticules.

Dans ce travail, nous établissons une expression analytique de la réponse optique effective d'une monocouche de nanoparticules immergées dans un empilement de couches minces, en utilisant l'approximation quasi-cristalline (QCA) [5]. Ce modèle prend en compte la corrélation spatiale entre nanoparticules et permet d'intégrer les effets d'interaction électromagnétique entre nanoparticules.

2. Résultats

La nanostructure modélisée consiste en une monocouche désordonnée de nanoparticules d'argent incorporée dans un empilement de couches minces diélectriques sur un substrat semi-infini d'argent, voir Fig. 1(a). Notre objectif est de prédire le spectre réfléchi spéculairement, et donc la couleur structurale observée en réflexion spéculaire, en fonction de l'angle d'incidence θ .

Pour établir une référence, nous avons tout d'abord simulé la réponse optique d'une telle métasurface désordonnée avec un code numérique [6] basé sur la méthode de la matrice T . Une approche dite « super-cellule » a été utilisée pour s'affranchir des effets de taille finie. Le problème électromagnétique est ainsi réduit à un problème de diffraction par un réseau 2D, la puissance rayonnée dans l'ordre 0 en réflexion donnant ainsi accès à la réflectance spéculaire. Grâce à une analyse de convergence, nous avons trouvé un compromis entre efficacité numérique et précision, et retenu un ensemble de 50 nanoparticules pour la simulation numérique. Les spectres ont été moyennés sur 10 réalisations indépendantes du désordre, puis convertis en une couleur dans l'espace sRGB pour l'illuminant D65 par une approche standard.

La Fig. 1(b) présente les couleurs structurales observées en réflexion spéculaire en fonction de l'angle θ et de la profondeur de la monocouche de nanoparticules d'argent dans la couche de TiO_2 . Ces couleurs résultent de phénomènes d'interférences de couches minces dans le milieu stratifié et d'absorption plasmonique par la monocouche de nanoparticules d'argent.

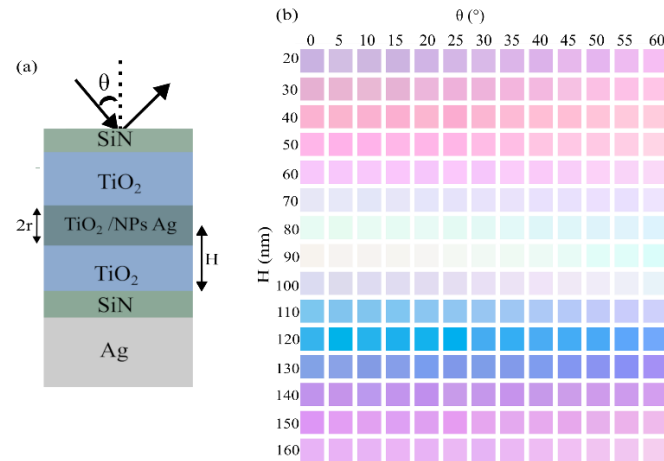


Figure 1. (a) Illustration de la structure considérée : un empilement de couches minces (Ag/SiN/TiO₂/SiN) contenant une monocouche de nanoparticules d'argent. Les nanoparticules, d'un rayon r de 20 nm, sont placées dans la couche de TiO₂, d'une épaisseur de 180 nm, à un taux de remplissage surfacique de 20%. Dans le modèle de milieu effectif, cette monocouche de nanoparticules est remplacée par une couche homogène d'épaisseur $2r$ décrite par un tenseur de permittivité effective. (b) Palette de couleurs structurales observées en réflexion spéculaire, telles que prédites par des simulations « super-cellule » avec la méthode de la matrice T.

Dans le poster, nous discuterons du modèle théorique que nous avons développé pour prédire ces mêmes variations de couleurs et montrerons l'impact significatif des corrélations structurales, décrites par une fonction de corrélation de paire, sur les couleurs produites.

3. Perspectives

Les prédictions théoriques issues de notre modèle seront prochainement comparées à des données expérimentales, obtenues par nos collègues à Saint-Etienne, sur des structures similaires à celles modélisées. En proposant un modèle prédictif pour la réflectance de métasurfaces désordonnées, ce travail ouvre la voie à la conception de revêtements produisant des couleurs structurales désirées, pour des applications notamment en impression de sécurité.

4. Remerciements

Ce travail est financé par l'Agence Nationale pour la Recherche via le projet ANR-23-CE39-0006 SLICID (« Impression laser sécurisée d'images couleurs dans les documents d'identité »).

5. Bibliographie

- [1]Lalanne P *et al.*, Disordered optical metasurfaces: basics, properties, and applications, *Adv. Opt. Photon.*, vol. **17**, pp. 45-112, 2025.
- [2]Vynck K *et al.*, The visual appearances of disordered optical metasurfaces, *Nat. Mater.*, vol. **21**, pp. 1035-1041, 2022.
- [3]Dalloz N *et al.*, Anti-Counterfeiting White Light Printed Image Multiplexing by Fast Nanosecond Laser Processing, *Advanced Materials*, vol. **34**, pp. 2104054, 2022.
- [4]Sasihithlu K *et al.*, A surface-scattering model satisfying energy conservation and reciprocity, *J. Quant. Spectr. Radiat. Transf.*, vol. **171**, pp. 4-14, 2016.
- [5]Tsang L and Kong JA, *Scattering of Electromagnetic Waves, Advanced Topics*. Wiley, 2004.
- [6]Egel A *et al.*, SMUTHI: A python package for the simulation of light scattering by multiple particles near or between planar interfaces, *J. Quant. Spectr. Radiat. Transf.*, vol. **273**, pp. 107846, 2021.

Self-Organized Freeform Waveguiding

F. Chehami¹, C. Decroze¹, D. Smith², T. Fromentèze¹

¹ : University of Limoges, XLIM, UMR 7252, F-87000 Limoges, France

² : Center for Metamaterials and Integrated Plasmonics, Department of Electrical and Computer Engineering,
Duke University, Durham, North Carolina 27708, USA
Fadhila.chehami@unilim.fr

Abstract

Inspired by biological morphogenesis, we introduce an optimization-free approach for the automated generation of self-organized freeform waveguides that adapt to complex propagation paths. Our method relies on local reaction-diffusion dynamics to produce robust, spatially distributed structures. In contrast to conventional waveguides based on periodic media, which impose strong geometric constraints and require extensive fine-tuning, the proposed structures support nontrivial geometries while maintaining electromagnetic band gap behavior. We experimentally demonstrate that these self-organized waveguides achieve superior transmission efficiency along complex paths. This optimization-free strategy enables the automated design of advanced electromagnetic components with intrinsic adaptability.

1. Introduction

Efficient light guiding through complex geometries is a central challenge in modern photonics, since conventional waveguides and photonic crystals suffer from losses when signals follow arbitrary or intricate paths. Although various optimization strategies have been developed, ranging from parametric tuning to topology optimization these methods require heavy computation, case-specific design, and add fabrication complexity, which limits their broader applicability [1]. In this work, we propose a fundamentally different strategy inspired by Turing's morphogenesis theory [2]. Instead of relying on global optimization, we generate self-organized hyperuniform disordered structures through simple local interaction rules. These media inherently suppress long-range density fluctuations, enabling isotropic electromagnetic band gaps without structural periodicity. As a result, they naturally conform to arbitrary guiding paths, offering robust, broadband, and low-loss wave propagation.

2. Morphogenetic generative technique

In this paper, we present a novel design methodology inspired by Turing's morphogenesis theory, which provides a framework for understanding the emergence of complex structures in nature. This generative approach, formulated as a reaction-diffusion system, relies solely on local interaction rules, making it highly adaptable to intricate geometries and scalable to large computational domains. Specifically, we employ the Gray–Scott reaction-diffusion model [3], which describes the interaction and diffusion of two chemical species, U and V, governed by the following differential equations:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = d_U \nabla^2 U - UV^2 + f(1 - U) \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} = d_V \nabla^2 V + UV^2 - (f + k)V \quad (2)$$

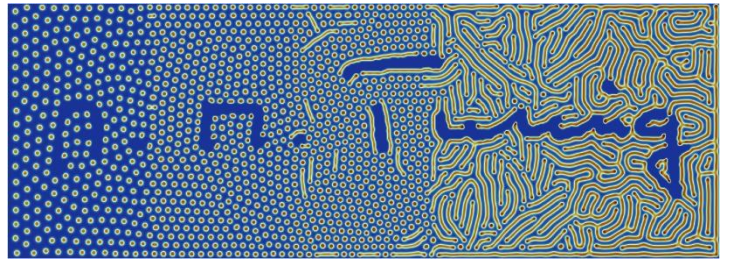


Figure 1 : Turing's patterns generation under geometric constraints

The dynamic equilibrium between the populations of U and V enables the emergence of diverse patterns with varying sizes and geometries (Fig. 1). Based on our previous studies, we focus here on circular patterns, which

have been shown to be particularly suitable for generating disordered hyperuniform distributions exhibiting isotropic electromagnetic band gaps, without relying on any gradient descent algorithms [4]. By tuning the parameters f , k , d_U , and d_V both the radius of individual patterns and the spacing between them are controlled thus allowing precise tailoring of the electromagnetic band gap within the target frequency range of 18–26 GHz.

3. Results

The pattern distributions are extruded along the vertical axis to form a lattice of dielectric alumina rods ($\epsilon = 9.8$). The S-shaped waveguide is designed by imposing the desired trajectory as a design constraint during the generative process. The resulting patterns naturally conform to the prescribed waveguide geometry, including sharply curved sections, while maintaining an optimal filling density, as illustrated in Fig. 2(a). Analysis of S-parameters demonstrates excellent transmission performance across the targeted frequency range, without requiring the optimization procedures typically needed in conventional periodic structures (Fig. 2(b)). Electromagnetic field mapping further confirms efficient wave propagation at 20 GHz, showing that the guided wave closely follows the intended path even through regions with strong curvature, as seen in Fig. 2(c).

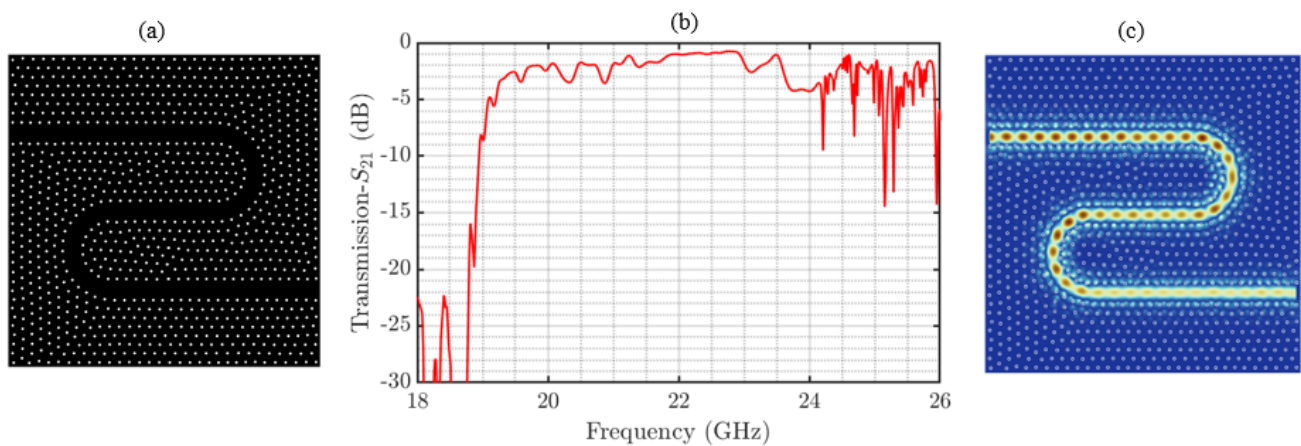


Figure 2 : (a) Top view of the designed S-shaped freeform waveguide. (b) Calculated S_{21} parameter. (c) Spatial electric field map at $f = 20$ GHz.

4. Conclusion

This work introduces the first optimization-free strategy for the design of efficient freeform waveguides capable of operating across broad frequency ranges. Inspired by the principles of biological morphogenesis, the proposed method relies solely on local interactions to generate spatially structured, self-organized media with tailored electromagnetic properties. By circumventing conventional optimization loops, it enables the formation of hyperuniform disordered distributions that naturally adapt to complex boundary constraints.

6. Bibliographie

- [1] Chen, J. H., Huang, Y. T., Yang, Y. L., Lu, M. F., & Shieh, J. M. (2012). Design, fabrication, and characterization of Si-based ARROW photonic crystal bend waveguides and power splitters. *Applied optics*, 51(24), 5876-5884.
- [2] AM Turing. The chemical basis of morphogenesis. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B*, 237(641):37–72, 1952.
- [3] Gray, P., Scott, S., “Autocatalytic reactions in the isothermal, continuous stirred tank reactor: isolas and other forms of multistability”, *Chem. Eng. Sci*, 38, 29–43, 1983.
- [4] Chehami, F., Decroze, C., Pasquet, T., Perrin, E., & Fromenteze, T. (2023). Morphogenetic design of self-organized correlated disordered electromagnetic media. *ACS photonics*, 10(6), 1890-1898.

Complex dispersion of Rayleigh-Bloch waves

V. Laude¹

¹ : Université Marie et Louis Pasteur, SUPMICROTECH, CNRS, institut FEMTO-ST, 25000
Besançon
vincent.laude@femto-st.fr

Résumé

Les ondes de Rayleigh-Bloch sont des ondes acoustiques guidées qui se propagent le long d'une ligne périodique d'inclusions placées à l'intérieur d'un milieu ouvert et infini. Sous le cône du son, elles sont transversalement évanescentes des deux côtés de la ligne d'inclusions. Le guidage est alors réalisé sans aucune gaine entourant un cœur segmenté. Les inclusions imposent généralement des conditions aux limites définies, ce qui donne lieu à une seule bande guidée. Nous considérons plutôt le cas d'inclusions perméables et lentes à l'intérieur d'un milieu rapide. En introduisant le concept de modes quasi-normaux guidés, nous obtenons la relation de dispersion complexe en tenant compte du rayonnement à l'infini. Nous montrons ainsi que plusieurs bandes portant des ondes de Rayleigh-Bloch à pertes apparaissent et que des états guidés dans le continuum résultent de la combinaison de la symétrie et de la périodicité.

Rayleigh-Bloch waves are guided waves propagating along a periodic line array of inclusions placed inside an infinite, open medium. Below the sound cone associated with radiation in the surrounding medium, they are transversely evanescent on both sides of the line of inclusions. They are interesting in practice since guidance can be achieved without any cladding surrounding the segmented core, for instance for transmission of information or for sensing. We consider here the scalar case of acoustic Rayleigh-Bloch waves guided by slow inclusions inside a fast medium. Of special interest is the complex dispersion relation of Rayleigh-Bloch waves both inside and outside the sound cone.

Considering the periodic unit-cell containing a single inclusion, one can consider computing the one-dimensional phononic band structure, giving frequency as a function of the Bloch wavenumber varying inside the first Brillouin zone. The open character of the computation domain, however, has to be properly considered. In this regard, we obtain the resolvent phononic band structure by adjoining perfectly-matched layers on either side of the computation domain. With this technique, the complex-frequency dispersion relation is revealed as a function of the real wavenumber, with the imaginary part of the frequency accounting for radiation loss of Rayleigh-Bloch waves¹.

Quasi-normal mode analysis for phononics is here extended to include the case of guided waves. Quasi-normal modes (QNMs) have a complex eigenfrequency that can be estimated by a search inside the complex dispersion plane. As a result, we obtain both the eigenmodes and the quality factor Q of the associated resonance. Interestingly, certain QNMs at the high-symmetry points of the first Brillouin zone uncouple from bulk radiation modes (their quality factor is infinite), allowing to identify them as bound states in the continuum (BIC). These different results are discussed as a function of the velocity contrast between the inclusion and the surrounding propagation medium.

Bibliographie

[1] Laude, V. (2025). Complex dispersion relation of Rayleigh-Bloch waves trapped by slow inclusions. *Phys. Rev. B* 111 (22), L220101.

Métasurface programmable combinée à de l'apprentissage profond pour l'estimation de la direction d'arrivée

N. Meftah¹, B. Ratni¹, M. N. El Korso², S. N. Burokur¹

¹ : LEME, Univ Paris Nanterre, F92410 Ville d'Avray, France,

² : Université Paris-Saclay, CNRS, CentraleSupélec, Laboratoire des signaux et systèmes, 91192 Gif-sur-Yvette, France
 nr.meftah@parisnanterre.fr

Résumé

Nous présentons une méthode d'estimation de la direction d'arrivée (DOA) qui exploite une métasurface programmable jouant le rôle de réflecteur électronique et un réseau de neurones multicouches (MLP). Le système utilise le vecteur de puissances mesuré pour 17 configurations de phase cylindro-paraboliques (états) du méta-réflecteur, et le MLP permet de prédire l'angle d'arrivée d'un signal. Des essais en chambre anéchoïque sur la plage angulaire d'arrivée -40° à $+40^\circ$ montrent une estimation de haute précision, avec une erreur quadratique moyenne (MSE) d'environ $0,3^{02}$ et 94 % des prédictions dont l'erreur absolue est inférieure à 1° .

1. Introduction

L'estimation de DOA est classiquement réalisée par des réseaux d'antennes et des algorithmes de sous-espaces tels que MUSIC et ESPRIT, qui offrent une haute résolution mais restent coûteux en matériel et en calcul, et sensibles aux non-idéalités des réseaux. Les métasurfaces reconfigurables constituent une alternative compacte et simple : en modulant localement la phase, elles permettent d'orienter le faisceau sans la partie mécanique, et se prêtent à des architectures programmables [1], [2].

Nous exploitons alors une signature directionnelle formée par les niveaux de puissance enregistrés pour plusieurs états du méta-réflecteur, que le MLP apprend à associer à l'angle d'arrivée [3]. Les performances expérimentales correspondantes sont présentées dans notre étude.

2. Dispositif et protocole expérimental

Le méta-réflecteur présente une surface de $180 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$ et comprend 30×30 méta-atomes. Chaque méta-atome intègre une diode varactor commandée en tension, permettant d'ajuster la phase en réflexion de manière quasi-continue ($\approx 270^\circ$ à 10 GHz). Une antenne patch est placée au foyer à 30 mm du réflecteur. Elle sert de récepteur RF et est reliée à un analyseur de spectre qui mesure la puissance reçue. L'ensemble de la chaîne (génération des profils de phase, acquisition) est piloté par un Raspberry Pi.

Une antenne cornet, qui permet de simuler la DOA, est placée en champ lointain pour émettre un signal dans une plage azimutale de -40° à $+40^\circ$ avec un pas de 1° (Figure 1(a)), soit 81 angles (DOA) testés. Pour chaque angle, 17 profils de phase cylindro-paraboliques sont appliqués successivement (états) pour réaliser un pointage électronique par pas de 5° du méta-réflecteur. À chaque état, un niveau de puissance est mesuré ; on obtient ainsi, pour chaque angle, un vecteur d'entrée de 17 puissances que le MLP utilise pour prédire l'angle d'arrivée. Les mesures sont effectuées en chambre anéchoïque et répétées trois fois sur l'ensemble des angles, soit $81 \times 3 = 243$ échantillons. Le jeu est ensuite augmenté par bruit gaussien calibré pour atteindre 1215 échantillons. On applique une normalisation relative par échantillon, puis une standardisation par caractéristique. Les données sont décomposées comme suit : 80% pour l'entraînement et 20% pour les tests.

Un MLP à deux couches cachées de 100 neurones avec activation hyperbolique est entraîné. Les hyperparamètres sont choisis par optimisation bayésienne avec validation croisée à 10 plis. L'apprentissage minimise la MSE pour relier le vecteur de puissances à l'angle d'arrivée.

3. Résultats et Conclusions

Sur le jeu de tests, la méthode retrouve l'angle avec une haute précision : $MSE \approx 0,3^{\circ 2}$ et 94 % des prédictions avec $|\text{erreur}| < 1^{\circ}$. Comme le montre la Figure 1(b), la distribution de l'erreur de prédiction est centrée près de 0° et resserrée, avec des queues faibles au-delà de 1° , indiquant l'absence de biais notable et la stabilité des estimations.

Une précision inférieure au degré est obtenue avec 17 états du méta-réflecteur sur $\pm 40^{\circ}$, sans recourir à un balayage angulaire très fin. Le système reste simple sur le plan matériel (un seul récepteur RF) et rapide en estimation, ce qui le rend adapté à une intégration embarquée pour des fonctions de détection et de localisation.

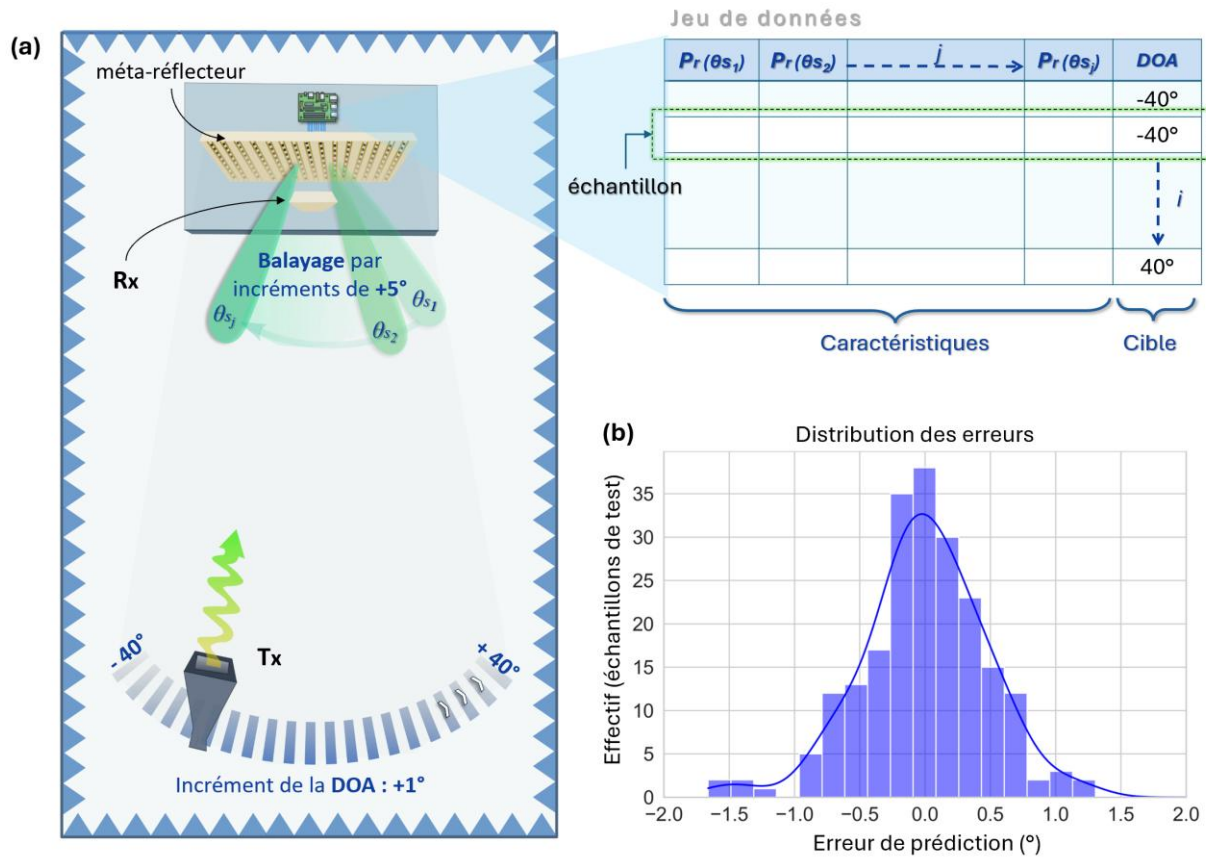


Figure 1. (a) Dispositif expérimental de collecte des données. (b) Diagramme représentatif de la distribution de l'erreur de prédiction.

4. Bibliographie

- [1] M. Huang *et al.*, "A comprehensive review of metasurface-assisted direction-of-arrival estimation," *Nanophotonics*, vol. 13, no. 24, pp. 4381–4396, Nov. 2024.
- [2] N. Meftah, B. Ratni, M. N. El Korso, and S. N. Burokur, "Programmable Meta-Reflector for Multiple Tasks in Intelligent Connected Environments," *Advanced Materials Technologies*, vol. 9, no. 12, p. 2400006, 2024.
- [3] N. Meftah, B. Ratni, M. N. El Korso, and S. N. Burokur, "Enhanced-Resolution Learning-Based Direction of Arrival Estimation by Programmable Metasurface," *Advanced Electronic Materials*, vol. 11, no. 3, p. 2400476, 2025.

Characterization of nanostructured materials by Brillouin Light Scattering

Fehima Ugarak¹, Alexis Mosset¹, and Vincent Laude¹

¹: Université Marie et Louis Pasteur, SUPMICROTECH, CNRS, Institut FEMTO-ST, 25000 Besançon, France

Email 1^{er} auteur: fehma.ugarak@femto-st.fr

Abstract

This work explores the use of Brillouin Light Scattering (BLS) and Surface BLS (SBLS) to investigate the elastic and piezoelectric properties of a range of materials, from crystalline substrates to synthetic and natural fibers and thin films. By analyzing phonon dispersion and applying numerical simulations, the study accurately extracts mechanical constants and characterizes wave propagation in anisotropic and layered structures. The results highlight BLS as a powerful, non-destructive technique for evaluating material behavior at micro- and nanoscale dimensions.

1. Introduction

Brillouin light scattering (BLS) is a powerful technique for probing the dispersion of surface and bulk acoustic phonons in both amorphous and crystalline solids. It relies on the inelastic scattering of light by spontaneous thermal fluctuations, corresponding to acoustic phonons. The scattering process depends on the dielectric tensor fluctuations of the material and is influenced by its optical properties and light penetration depth. BLS spectra contain contributions from both bulk and surface phonons, with the dominant mechanism depending on the sample's thickness and transparency. Bulk phonons are prevalent in crystals, fibers, and biological samples, while surface phonons dominate in opaque surfaces, thin films, and multilayered structures. By analyzing BLS data, one can extract material tensors, provided the sample's symmetry, mass density, and refractive indices are known. For piezoelectric materials, knowledge of the piezoelectric e_{kij} and dielectric tensor ϵ is also required. A complete characterization typically involves multiple sample orientations and scattering geometries. However, in this study, we focus on measuring anisotropic material tensors using a single sample of a trigonal single crystal [1] or a fiber with transverse symmetry [2]. To ensure a comprehensive analysis, a diverse range of phonon wavevectors must be sampled. For surface phonons, BLS has been used to study the elastic properties of silicon wafers [3], CoFeB layers [4], and multilayer structures.

2. Materials and Methods

In solid anisotropic materials, three acoustic phonons propagate in a given direction, defining three velocity surfaces. The quasi-longitudinal phonon primarily involves compression-expansion along the propagation direction, while the two quasi-shear phonons represent perpendicular shear vibrations. The Brillouin light scattering (BLS) technique provides frequency shifts proportional to the phonons' phase velocities via the photoelastic effect. The phonon velocities v are obtained by solving the Christoffel equation for a harmonic plane wave $u_i(t, \mathbf{r}) = \hat{u}_i \exp(i(\omega t - \mathbf{q} \cdot \mathbf{r}))$. The Christoffel equation describes an eigenvalue problem, $\Gamma_{il} \hat{u}_l = \rho v^2 \hat{u}_i$, where ρ is the mass density, and $\Gamma_{il} = c_{ijkl} \bar{n}_j \bar{n}_k$. For non-piezoelectric materials, Γ_{il} depends only on the elastic tensor c_{ijkl} , while for piezoelectric materials, it is modified as $\Gamma_{il} = c_{ijkl} \bar{n}_j \bar{n}_k + (\gamma_i \gamma_l) / \epsilon$, with $\gamma_i = e_{kij} \bar{n}_j \bar{n}_k$ and $\epsilon = \epsilon_{jk} \bar{n}_j \bar{n}_k$. The eigenvalues of Γ_{il} , for a specific direction of wave propagation, yield three wave velocities: one longitudinal and two quasi-shear.

In general, for Surface Brillouin Light Scattering (SBLS) in backscattering, the in-plane phonon wavenumber is given by $q = 2k \sin \phi$, where $k = 2\pi/\lambda$. The Brillouin peak is Lorentzian, centered at frequency f , with a width depending on phonon lifetime. Surface phonons modulate the sample

surface, causing dynamic corrugation, or the ripple effect, which is maximized for sagittally polarized SAWs when using p-polarized light [5]. In this study, we examine CoFeB/Ta/Ru multilayers on silica/silicon, (001) LN, and (001) LN on (001) sapphire substrates. SBLS measurements reveal high-frequency guided elastic waves (5–16 GHz), including Rayleigh, Sezawa, and leaky surface waves. The experimental results are compared with finite element method (FEM) simulations incorporating perfectly matched layers (PML) to account for substrate radiation and piezoelectric effects.

3. Results

We estimated all six independent elastic constants of non-piezoelectric sapphire and the six elastic constants, along with four piezoelectric constants, of lithium niobate. The estimated elastic and piezoelectric constant values align closely with the literature-reported values obtained through resonant ultrasonic techniques. These values enabled us to access the velocity curves, providing insights into the anisotropy and directional dependence of elastic wave propagation in a material, revealing its mechanical properties and symmetry. The elastic properties of E-glass, silk, PA11, and flax fibers were investigated using micro-BLS. The measured axial Young's modulus was 89.50 GPa for E-glass, 14.42 GPa for PA11, and 134.8 GPa for flax. Although BLS measurements on synthetic silk fibers have not been documented, the longitudinal modulus of 18.98 GPa and the transverse Young's modulus of 11.75 GPa obtained in this work closely correspond to the values obtained via BLS reported by Wang et al. [6] for spider silk, which are 20.9 GPa and 9.2 GPa, respectively. The transverse Young's modulus values were 6.16 GPa for PA11 and 11.9 GPa for flax. Poisson's ratio ranged from 0.2 (E-glass) to 0.7 (flax). These results align with previous studies, with the flax fiber modulus showing significantly higher values. For CoFeB multilayers, four modes were identified on LN-based structures, and six modes were found on ZX-sapphire structures. Improved surface acoustic wave propagation was observed in the presence of a metal stack.

4. Conclusion

The application of a general fitting procedure allowed for the accurate determination of elastic and piezoelectric constants in crystals and fibers. Minor standard deviations and convergence of the fit supported confidence in these results. The obtained elastic properties of fibers confirm the validity of transversely isotropic modeling. Notably, the flax fiber showed significantly higher longitudinal modulus than other fibers. SBLS studies revealed distinct dispersion characteristics in CoFeB-based multilayers, where the elastic constants of CoFeB are obtained, reinforcing the method's capability for thin-film characterization.

5. Bibliographie

- [1] Ugarak, F., et al. Estimation of the elastic and piezoelectric tensors of sapphire and lithium niobate from Brillouin light backscattering measurements of a single crystal sample. *Journal of Applied Physics*, (2023).
- [2] Ugarak, F., et al. Anisotropic elastic properties of synthetic and natural fibers determined by micro-Brillouin light spectroscopy. *Journal of Physics D: Applied Physics*, (2025).
- [3] Ugarak, F., Mosset, A., Laude, V. Velocity of subsonic and hypersonic surface acoustic waves on silicon with native oxide layer. *Applied Physics Letters*, (2024).
- [4] Ugarak, F., et al. Surface Brillouin light spectroscopy of high-frequency guided elastic waves in CoFeB-multilayers on lithium niobate. *Journal of Physics D: Applied Physics*, (2025).
- [5] Mutti, P. et al. Surface Brillouin scattering-extending surface wave measurements to 20 GHz (1995).
- [6] Wang, X. et al. Brillouin Spectroscopy of Spider Silk (2020).

Filtres CRIGF en AlGaAs/GaAs : vers une accordabilité active ?

T. Blandin¹, M. Arribat¹, A. Lecestre¹, J.-Y. Duboz², O. Gauthier-Lafaye¹
¹ : LAAS-CNRS, Université de Toulouse, Toulouse,
² : CRHEA, CNRS Université Côte d'Azur, Nice
 tanneguy.blandin@laas.fr

Résumé

Nous présentons des premiers résultats de filtres CRIGFs réalisés en GaAs/AlGaAs vers 900 nm visant à réaliser des filtres optiques accordables par effets Stark confiné dans des puits quantiques.

1. Introduction

Les matériaux semi-conducteurs présentent de nombreuses propriétés permettant une modulation active de leur indice optique. Notamment, l'effet Stark quantique confiné (QCSE, Quantum Confined Stark Effect), un effet potentiellement ultra-rapide, est couramment utilisé pour moduler l'électro-absorption dans les modulateurs télécoms. Il a récemment été utilisé pour réaliser des metasurfaces activement contrôlables via une modulation d'indice sous l'énergie de bande interdite (dans la gamme de transparence du semi-conducteur) [1]. Nous présentons ici de premiers résultats visant à utiliser cet effet pour réaliser des filtres dits CRIGFs [2] électro-accordables sur GaAs, à l'instar de ce que nous avons déjà démontré sur des films de niobate de lithium en couches minces [3].

2. Conception et fabrication des structures

La structure verticale typique d'un filtre CRIGF est représentée en figure 1. Elle comprend un empilement de couches permettant de réaliser un guide d'onde planaire, et une couche réseau qui permettra de réaliser deux DBR latéraux (permettant le confinement du mode) et un réseau central de couplage pour le faisceau incident. Pour réaliser des filtres CRIGF accordables par effet électro-optique, la conception des structures répond à des besoins contradictoires. D'une part, il est nécessaire de réaliser un guide d'onde à faible confinement, permettant un fort recouvrement entre un mode guidé et un réseau, et abaissant suffisamment l'indice effectif du mode guidé pour permettre une réalisation plus aisée des réseaux sub-longueur d'onde, et d'autre part, la structure doit comporter un nombre de puits quantiques suffisant pour permettre une modulation efficace de l'indice optique, ainsi que des couches barrière suffisamment épaisses permettant de limiter les courants parasites lors de l'application du champ de modulation.

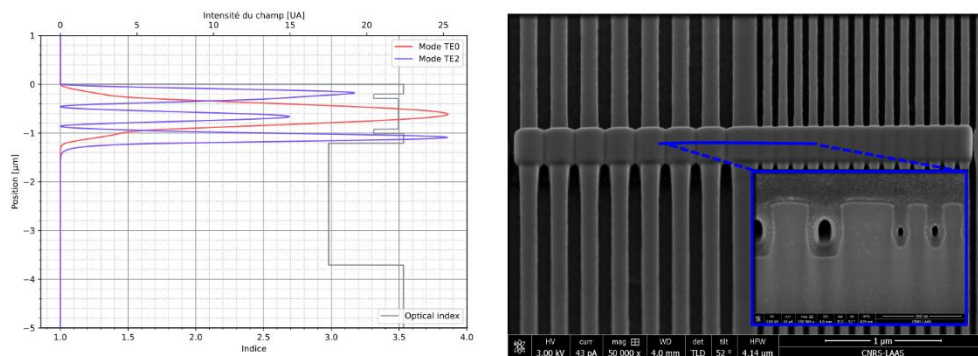


Figure 1. Gauche : structure de l'empilement utilisé pour réaliser des CRIGFs AlGaAs/GaAs, droite : vue en microscopie électronique et coupe FIB (insert) d'un filtre réalisé.

Nous avons finalement convergé vers une structure représentée en fig. 1 dans laquelle le mode excité TE2 sera exploité pour obtenir la résonance de Fano visée pour le fonctionnement du filtre.

Ces filtres ont ensuite été caractérisée sous illumination optique. La figure 2 montre l'évolution des spectres de réflectivité en fonction de la période du réseau central du CRIGF. L'analyse des longueur d'onde de résonance montre un bon accord avec les prédictions théoriques.

Lors de la présentation, nous présenterons les premiers résultats d'accordabilité active thermique obtenus sur ces filtres, et discuterons des perspectives ouvertes par la modulation par QCSE de ces structures.

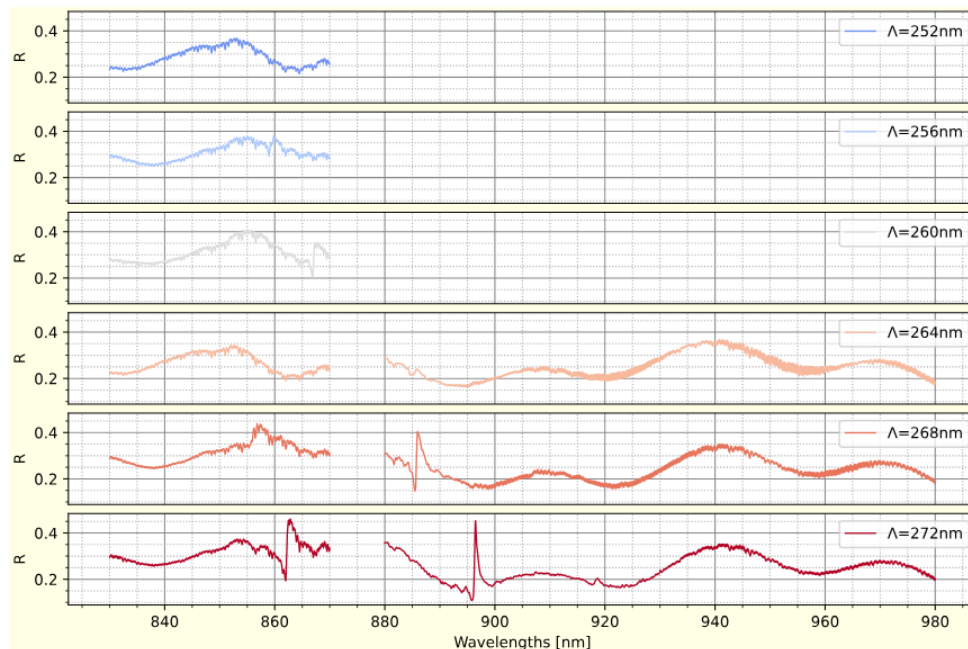


Figure 2. Spectres expérimentaux mesurés sur des filtres de différentes périodes de base.

3. Conclusion

Ces premiers résultats ouvrent la voie à la réalisation de filtres CRIGFs accordables dynamiquement par modulation d'inde par QCSE, dans une gamme de longueur d'onde (900 nm) particulièrement intéressante pour des applications comme les LIDAR par exemple.

5. Remerciements

Ces travaux ont été supportés par la centrale de technologie du LAAS-CNRS, membre du réseau RENATECH, réseau national des salles blanche académiques. Les travaux sont supportés par l'ANR dans le cadre de l'ANR SWEET (ANR-22-CE24-0005)

6. Bibliographie

- [1] P. C. Wu *et al.*, « Dynamic beam steering with all-dielectric electro-optic III–V multiple-quantum-well metasurfaces », *Nat. Commun.*, vol. 10, n° 1, p. 3654, août 2019, doi: 10.1038/s41467-019-11598-8.
- [2] J. Inoue *et al.*, « Aperture Miniaturization of Guided-Mode Resonance Filter by Cavity Resonator Integration », *Appl. Phys. Express*, vol. 5, n° 2, p. 022201, janv. 2012, doi: 10.1143/APEX.5.022201.
- [3] A. Monmayrant *et al.*, « Cavity resonator-integrated guided-mode resonance filters with on-chip electro- and thermo-optic tuning », *Opt. Express*, vol. 30, n° 10, p. 16669, mai 2022, doi: 10.1364/OE.457149.

La phase en nanophotonique pour les applications capteurs : cas des métasurfaces avec une singularité de phase

T. Girerd¹, F. Mandorlo¹, T. Benyattou¹, X. Letratre², C. Jamois², L. Ferrier² and L. Berguiga^{2,*}

¹INSA Lyon, Ecole Centrale de Lyon, CNRS, Université Claude Bernard Lyon 1, CPE Lyon, INL, UMR5270, 69621 Villeurbanne, France

²Ecole Centrale de Lyon, INSA Lyon, CNRS, Université Claude Bernard Lyon 1, CPE Lyon, INL, UMR5270, 69130 Ecully, France

* lotfi.berguiga@cnrs.fr

Résumé

Nous explorons l'impact des singularités de phase de cristaux photoniques Tamm plasmon sur la sensibilité en phase et la limite de détection de capteur. Nous avons établi un modèle à partir de la théorie des modes couplés [1] qui permet de modéliser la réflectivité en complexe de la métasurface et de décrire le comportement en phase du capteur. Nous avons pu mettre en évidence expérimentalement deux résultats importants. Premièrement : le rôle des différents paramètres physiques (facteur de qualité, sensibilité spectrale, longueur d'onde et le minimum de réflectivité à la résonance) sur la sensibilité en phase qui augmente drastiquement lorsque l'on s'approche du couplage critique et de sa singularité de phase. Deuxièmement La mise en évidence du rôle du couplage critique sur le bruit de phase qui annule l'effet bénéfique de la sensibilité : le couplage critique n'a aucun effet sur la limite de détection. Ce résultat va à l'encontre de ce qui est communément admis sur les singularités de phase c'est-à-dire une amélioration des propriétés du capteur de phase.

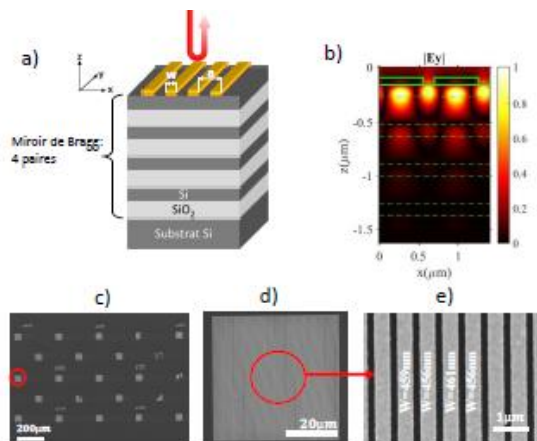
Pour arriver à ces conclusions nous avons pu explorer les singularités de phase grâce à :

- un contrôle lors de la nanofabrication des paramètres géométriques du réseau de tiges d'or déposées sur le miroir de Bragg qui permet de s'approcher au plus près du couplage critique et de sa singularité de phase[2].
- l'utilisation d'un banc original d'interférométrie par holographie qui permet d'exciter les métasurfaces localement et de mesurer la réflectivité complexe (amplitude et phase) jusqu'à des niveaux très bas en intensité ($R < 10^{-6}$)[3]
- l'élaboration d'un modèle théorique qui a permis d'identifier quantitativement les paramètres clefs sur la fonction capteur de phase

1. Introduction

La phase dans le domaine de la nanophotonique connaît un intérêt croissant avec l'arrivée des concepts de topologie. Les métasurfaces avec les singularités de phase sont connues pour être de bon capteur de phase [4]. Cependant les études expérimentales sont encore balbutiantes et pratiquement inexistantes concernant les capteurs de phase (en dehors des mesures classiques de capteur). Ce travail apporte une approche de caractérisation en phase de ce type de métasurface.

2. Structure photonique : Tamm plasmon



3. Résultats expérimentaux

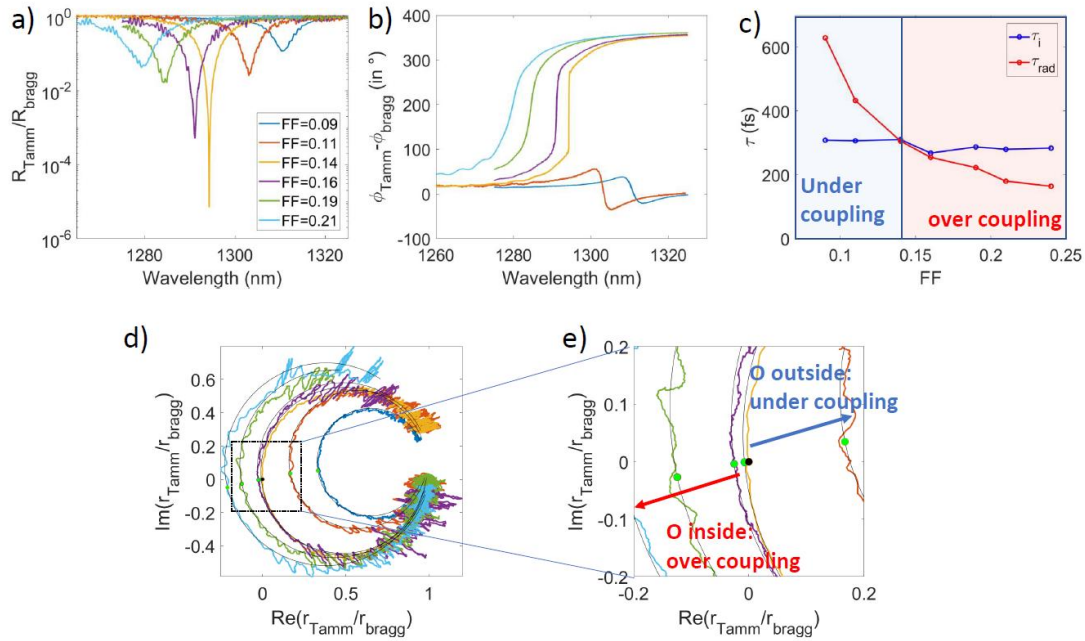


Figure 2 : Exploration expérimentale du couplage critique et de sa singularité de phase d'une structure Tamm plasmon en intensité (a) en phase (b) et avec une représentation complexe en d) et f). Ces courbes permettent d'extraire les constantes de temps (pertes internes en bleu et radiatives en rouge) du modèle de la théorie des modes couplés qui confirme le couplage critique lors de leur égalisation pour un facteur de remplissage FF autour de 0.14.

4. Conclusion

Nous proposons ici une nouvelle approche pour caractériser le fonctionnement des capteurs en phase travaillant dans le régime couplage du critique. Ces résultats sont généralisables pour des capteurs en intensité ou avec le décalage de Goss-Hänchen. Elle ouvre la voie vers l'exploration en phase de métasurface. Et enfin cette approche pour la première fois permet de quantifier à la fois le rôle et l'intrication dans la chaîne du capteur, des propriétés de la métasurface (le transducteur), de la méthode de mesure choisie (phase, intensité, spectrale ou décalage de Goos-Hänchen) et de l'appareil expérimental de mesure.

6. Bibliographie

- [1] A. V. Kabashin, et al., Chemical Society Reviews 52, 6554–6585 (2023),doi : [10.1039/D3CS00155E](https://doi.org/10.1039/D3CS00155E)
- [2] Ferrier et al., Apl Photonics 2019, 4,106101.doi: [10.1063/1.5104334](https://doi.org/10.1063/1.5104334)
- [3] T. Girerd et al, Opt. Express 32, 3647 (2024), doi : [10.1364/OE.507643](https://doi.org/10.1364/OE.507643)
- [4] A. V. Kabashin, et al., Chemical Society Reviews 52, 6554–6585 (2023),doi : [10.1039/D3CS00155E](https://doi.org/10.1039/D3CS00155E)

LNOI Cavity-Resonant Integrated Grating Filters for Tunable, Fine-Resolution Spectroscopy

Kumar Kinjalk¹, Olivier Gauthier-Lafaye¹, Stéphane Calvez¹, Antoine Monmayrant¹

¹LAAS-CNRS, Université de Toulouse, CNRS, Toulouse, France,

Abstract

A tunable, fine-resolution on-chip spectroscopy platform is demonstrated using cavity-resonant integrated grating filters (CRIGFs) on lithium-niobate-on-insulator (LNOI). Coarse spectral positioning is achieved via multiple grating-period families, while fine resolution is provided by cavity phase-shift control; linear thermo-optic tuning then bridges residual gaps to ensure continuous coverage near 1.57 μm . Arrays exhibit >50% peak reflectivity with ~ 1.2 nm linewidths. Combining several grating periods with 21 phase-shift states per period yields 28.3 nm total span with 0.23 nm average sampling. Integrated microheaters provide ~ 2 nm/100 mW tuning with ~ 71 pm dispersion, enabling seamless interpolation between adjacent phase shifted states. These results establish a compact route to wide-span, fine-resolution, thermally reconfigurable spectroscopy on the LNOI platform.

1. Introduction

Accurate multi-gas detection for species such as CO_2 , CH_4 , NH_3 , and C_2H_2 (absorption spectra overlapping with the telecom band) [1], is crucial for climate and environmental monitoring. Conventional multispectral imagers using thin-film filters suffer from strong angle dependence, which degrades spectral fidelity and restricts system integration. To overcome these limitations, we employ lithium niobate on insulator (LNOI) based Cavity-Resonant Integrated Grating Filters (CRIGFs) that combine a high-finesse guided-mode resonance with a planar Fabry-Pérot cavity, achieving narrow linewidths and wide angular acceptance [2].

We propose a spectroscopic probing scheme that employs an array of CRIGFs integrated with Λ_{GC} sweeping and phase-shift length (L_{PS}) tuning to effectively scan the entire desired spectral range (1560-1580 nm). Fine spectral tuning is achieved via the thermo-optic effect in lithium niobate, providing precision wavelength control. Finally, we investigate how inhomogeneities in the thickness of the constituent films affect overall device performance and spectral response.

2. Device Design:

The filter, as shown in Figure 1 (Left), comprises an LNOI planar stack with a SiO_2 substrate and buffer, a thin-film lithium niobate core, and a patterned Si_3N_4 grating layer capped by an SiO_2 anti-reflection cladding for optical matching. The CRIGF is formed by two 400-period lateral DBRs on either side of a 17-period central grating coupler (GC), separated by a phase-shift region of length L_{PS} that establishes a planar Fabry-Pérot cavity with a high-finesse guided-mode resonance. Titanium microheaters are integrated above the cavity for thermo-optic tuning and are contacted with Au wires to external drive electronics to provide linear, reversible wavelength control without modifying the passive grating geometry.

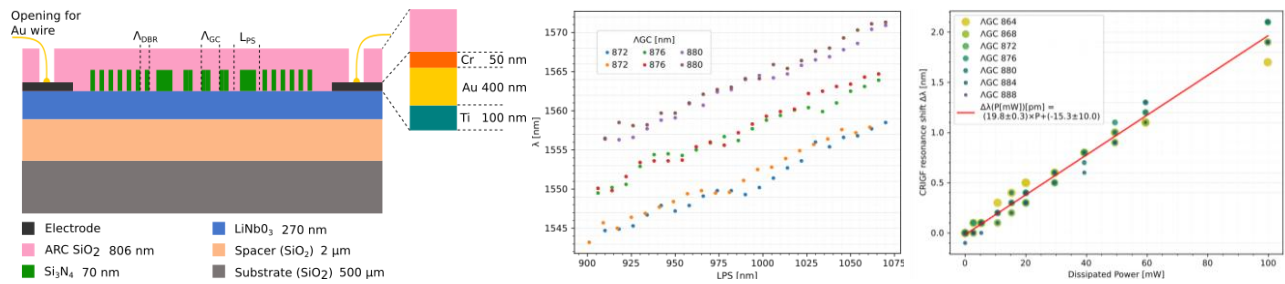


Figure 1. (Left): Vertical stack of proposed CRIGFs, (Middle): Resonant wavelength λ as a function of the phase shift length L_{PS} for varying GC periods Λ_{GC} . (Right): Relative resonant wavelength change with temperature for 7 CRIGFs with $\Lambda_{\text{GC}} = [864:4:888]$ nm.

3. Results and Discussion

A $16 \times 11 \text{ mm}^2$ chip hosts 126 CRIGFs partitioned into two copies of grating-period families $\Lambda_{\text{GC}} = 872, 876, \text{ and } 880 \text{ nm}$; within each family, 21 phase shift variants span $L_{\text{PS}} = [1.03\text{--}1.22] \times \Lambda_{\text{GC}}$ to sweep the resonance across the 1560–1580 nm window with controlled step size. Figure 1 (Middle) shows that the resonant wavelength shifts systematically with L_{PS} across different Λ_{GC} values. The measured resonances, (peak reflectivity above 50% and linewidth of $\sim 1.2 \text{ nm}$, not shown in figure), were blue-shifted compared to theoretical prediction. This mismatch is attributed to a small underestimation of the effective refractive index (n_{eff}) in device design model. The intrinsic and coupling losses were evaluated as $k_a = 5.1 \pm 0.9 \text{ cm}^{-1}$ and $k_r = 10.9 \pm 0.8 \text{ cm}^{-1}$, respectively (not shown). We observed wavelength offset of about 0.45 nm between paired CRIGFs with nominally identical Λ_{GC} and L_{PS} , with the first set (blue–green–violet, devices on the left side of sample) showing shorter wavelengths than the second (orange–red–brown, devices on the right side of sample). This difference likely stems from a subtle effective index gradient ($\delta n_{\text{eff}} \approx 5 \times 10^{-4}$) across the sample, corresponding to a LiNbO_3 thickness variation of $< 0.5 \text{ nm}$. Unfortunately, achieving such precision in thickness uniformity remains a technological challenge. As a workaround a refined n_{eff} estimation and local thickness-uniformity control could be harnessed to compensate for this drift at the design stage. Despite these variations, the combination of 3 Λ_{GC} with L_{PS} -based tuning performed well, covering a 28.3 nm spectral range with sampling between 1.4 nm (worst case) and 0.23 nm (mean), and a tuning slope near 0.09. Although minor random deviations ($\sim 0.6 \text{ nm}$ SD) from linearity were observed, the full set of 126 CRIGFs achieved a continuous 28.3 nm coverage with an average sampling of 0.23 nm, ensuring fine and uniform spectral resolution.

Figure 1 (right) shows the thermal tuning behavior of seven CRIGFs with different Λ_{GC} values, illustrating the resonant wavelength as a function of the power dissipated in the micro heaters. The devices exhibit a linear wavelength shift of about 2 nm per 100 mW, corresponding to a tuning slope of $\Delta\lambda/\Delta P = 19.8 \pm 0.3 \text{ pm/mW}$, with minor device-to-device variations leading to a standard deviation of approximately 71 pm from linearity. Nonetheless, thermal tuning is both an order of magnitude larger than the mean sampling step and large enough to bridge the 1.4 nm worst-case sampling step obtained through Λ_{GC} & L_{PS} tuning, thereby seamlessly and effectively offering a continuous coverage of the whole spectral range.

3. Conclusion

Cavity-resonant integrated grating filters on LNOI deliver a compact, fabrication-tolerant route to wide-span, fine-resolution spectroscopy around $1.57 \mu\text{m}$ by combining grating-period families (coarse placement), phase-shift control (fine stepping), and linear thermo-optic tuning (gap-bridging). The platform achieves narrow linewidths with $>50\%$ peak reflectivity, continuous coverage approaching 30 nm with sub-nanometre sampling, and a stable thermal tuning slope near 20 pm/mW that reliably interpolates between phase-stepped states. Residual resonance spread from small n_{eff} and thickness variations is modest and readily compensated by thermal tuning and informed $\Lambda_{\text{GC}}/L_{\text{PS}}$ selection. These results validate LNOI CRIGFs as a practical basis for on-chip spectrometers and programmable filter arrays, with immediate improvement expected from tighter thickness and effective refractive index control.

4. Acknowledgement

This work was supported by LAAS-CNRS micro and nanotechnologies platform, a member of the Renatech French national network. This work was supported by CNES, the French space agency through the R&T Challenge "Fonctionnalisation des surfaces".

6. Bibliographies

- [1] I. E. Gordon, L. S. Rothman, R. J. Hargreaves, R. Hashemi, E. V. Karlovets, F. M. Skinner, et al., "The HITRAN2020 molecular spectroscopic database", *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* 277, 107949 (2022).
[doi:10.1016/j.jqsrt.2021.107949]
- [2] A. Monmayrant, S. Calvez, P. Calmon, P. Dubreuil, S. Charlot, A. Fehrembach, E. Popov, and Olivier G Lafaye, "Cavity resonator-integrated guided-mode resonance filters with on-chip electro-and thermo-optic tuning," *Opt. Express* 30, 16669-16676 (2022)

Démonstration de LED à boîtes quantiques émettant des vortex de lumière polychromatique et directionnelle

Guillaume Boulliard¹, Iannis Roland¹, Domitille Schanne¹, Marie Petolat¹, Pascal Filloux¹, Emmanuel Lhuillier², Aloyse Degiron^{1,*}

¹ : Université Paris Cité, CNRS, Laboratoire Matériaux et Phénomènes Quantiques, F-75013 Paris

² : Sorbonne Université, CNRS, Institut des NanoSciences de Paris, INSP, F-75005 Paris, France
aloyse.degiron@u-paris.fr

Résumé

Ces dernières années ont été marquées par de nombreux développements dans le domaine des sources optiques capables d'émettre des formes de lumière structurées, comme les vortex optiques ou des faisceaux vectoriels. Ces faisceaux structurés étant le résultat d'interférences soigneusement contrôlées, leur mise en œuvre nécessite une lumière cohérente, ce qui explique que toutes les sources démontrées jusqu'à présent reposent sur des cavités laser cohérentes, généralement pompées optiquement. Nous présentons ici des sources non laser émettant des faisceaux vortex directionnels par injection électrique. Leur architecture est constituée de LED à boîtes quantiques colloïdales qui intègrent un environnement photonique assurant deux fonctions complémentaires : permettre aux émetteurs de peupler des modes photoniques à cohérence spatiale étendue et structurer la fuite de ces modes dans l'espace libre. Nos sources pompées électriquement présentent des singularités de phase sur tout le spectre d'électroluminescence des boîtes quantiques, ce qui conduit à une émission de lumière vortex d'une largeur de bande de 300 nm dans le proche infrarouge.

1. Description de la structure étudiée

La figure 1 détaille l'architecture de la LED composée, de bas en haut : d'une cathode en aluminium, d'une couche de transfert d'électron en TiO₂, d'une spirale en or, d'un spacer de PMMA avec une ouverture au centre de la structure, une couche de boîtes quantiques colloïdales en PbS dopée N (il s'agit de la couche émettrice de lumière), d'une seconde couche de boîtes quantiques en PbS dopées P (cette fois-ci, il s'agit de la couche d'injection des trous) et d'une anode en ITO, un oxyde conducteur transparent.

Un élément clé est la couche de PMMA trouée en son centre. Seules les boîtes quantiques remplissant le trou central peuvent être pompées électriquement, ce qui restreint la source de lumière au centre de la structure. Nous réalisons ce faisant un filtrage spatial permettant de pallier la faible cohérence temporelle des modes. La lumière émise se retrouve piégée/guignée dans la couche de PMMA, ce qui permet d'augmenter considérablement sa longueur de cohérence spatiale. Il ne reste plus alors qu'à structurer ces modes pour leur donner la phase désirée, ce qui est accompli par la spirale d'or qui les renvoie dans l'espace libre avec une singularité de phase.

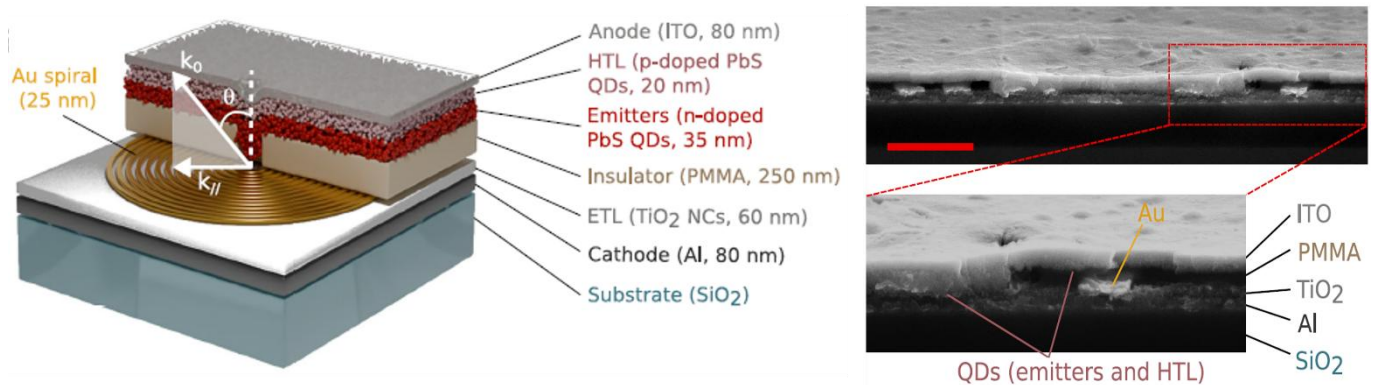


Figure 1. Schéma d'une LED à vortex (gauche) et vues MEB d'une section de l'échantillon. La barre d'échelle est de 1 μ m. Résultats adaptés de [1].

2. Mesure de la phase émise

Comme pour toutes les mesures de phase, il s'agit de réaliser des interférences. La lumière émise et polychromatique et n'a aucune cohérence temporelle. Il faut donc développer une méthodologie adaptée pour caractériser sa phase. La méthode est décrite dans la référence [1], en adaptant un algorithme bien connu de reconstruction de phase [2]. L'idée phare est de réaliser les interférences directement dans l'échantillon, à l'aide de LED où la spirale d'or est superposée à un réseau concentrique créant un faisceau gaussien à fronts d'ondes uniformes. Les mesures sont présentées dans la figure 2, en bon agrément avec un modèle analytique scalaire qui prend en compte les mécanismes clés à l'œuvre dans la LED.

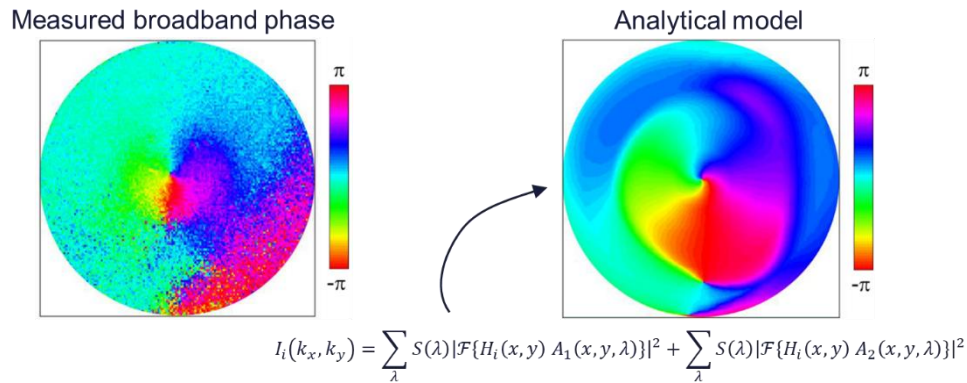


Figure 2. Reconstruction expérimentale de la phase (gauche) et comparaison avec notre modèle analytique scalaire. Le défi a été de développer une méthodologie permettant de caractériser l'émission de lumière fortement incohérente d'un point de vue temporelle. Résultats adaptés de [1].

3. Remerciements

Les auteurs remercient l'ERC (ERC CoG FORWARD n°771688, ERC CoG AQDtive 101086358 et l'ANR (ANR-21-CE24-0012) pour le soutien financier. La fabrication a été réalisée dans les salles blanches du Groupement des Plateformes de micro et Nano-technologies de Paris, avec le soutien de Renatech+ et d'Université Paris Cité.

4. Bibliographie

- [1] G. Boulliard et al., Quantum dot LEDs emitting broadband vortex beams, Nat. Comm. Vol. 16, 4974, 2025.
- [2] K.V. Creath, Phase-measurement interferometry techniques. In Progress in Optics 26 349–393 (Elsevier, 1988).

Nanofibre silice pour l'optique non-linéaire

S. Colombel, R. Morel, G. Fanjoux, K. Phan-Huy, T. Sylvestre, et J.-C. Beugnot
 Université Marie et Louis Pasteur, CNRS, Institut FEMTO-ST, 25030 Besançon, France
 jc.beugnot@femto-st.fr

Résumé

L'amincissement des fibres optiques permet d'exalter les effets non linéaire et l'interaction avec l'environnement via le champ évanescent. Ces propriétés offrent des applications inédites pour la création de capteurs et de lasers et la manipulation d'atomes. Nous présentons différents exemples de contrôle des interactions opto-acoustiques via le phénomène de diffusion Brillouin dans des nanofibres optiques en verre.

1. Introduction

L'amincissement des fibres optiques standard en silice par chauffage étirage permet de concevoir des fibres optiques de dimensions micrométriques voir nanométriques [1]. La très forte dispersion acoustique permet la génération d'onde élastique de différentes natures. De plus, le fort champ optique évanescent offre un outil inédit et adapté aux couplages dans les guides d'ondes nanométrique et à la réalisation de capteurs [2]. L'utilisation d'un gaz à haute pression autour de la nanofibre permet de créer une cellule de gaz à fibre optique. Ainsi le champ optique interagit fortement avec la silice mais également avec l'environnement extérieur.

2. Fabrication des nanofibres

Les nanofibres sont fabriquées à partir d'une méthode d'étirage de balayage à flamme fixe, où une fibre optique est positionnée entre deux platines de translation puis chauffée par une flamme [1]. Les mouvements cycliques des platines engendrent l'élongation de la fibre échauffée par la flamme. Traditionnellement, cette méthode utilise un protocole de contrôle des platines en trois phases donnant lieu à une transition adiabatique du mode optique fondamental de la fibre optique. Les pertes totales des nanofibres fabriquées sont de l'ordre de 0.1 dB à la longueur d'onde de 1550 nm.

3. Interaction dans la nanofibre

La lumière guidée par l'interface silice/air est l'objet d'un fort confinement favorisant l'apparition d'effets non linéaires. Dans le cas de la diffusion Brillouin, une onde optique pompe interagit avec les ondes acoustiques reflétant des ondes Stokes décalées en fréquence par effet Doppler.

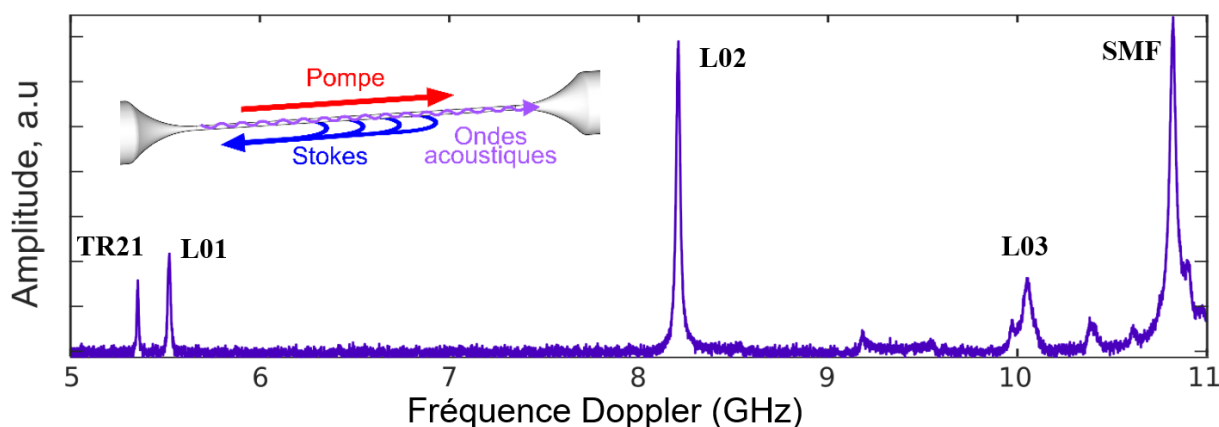


Figure 1 : Diffusion Brillouin dans une nanofibre optique. Spectre Brillouin spontané d'une nanofibre avec un diamètre de 740nm sur 10 cm de long. Encart, Schéma de l'interaction Brillouin rétrodiffusée dans une nanofibre.

Le spectre de rétrodiffusion Brillouin spontané d'une NF est présenté Fig1. L'apparition de plusieurs résonances Stokes est liée à la forte dispersion acoustique de la NF. Nous distinguons les contributions des ondes acoustiques hybrides (L02, L03) et de surface (TR21, L01) [3]. La résonance Stokes de la fibre SMF non étirée est autour de 11 GHz.

4. Interaction avec le champ évanescent de la lumière

La signature de la diffusion Brillouin qui est une interaction entre deux ondes optiques et une onde acoustique peut faire apparaître à la fois des interactions dans la silice mais également dans le gaz extérieur (fig2 (b,c)). Une fibre optique effilée dont le diamètre est de l'ordre de la longueur d'onde acoustique, fait apparaître plusieurs résonances Brillouin à des fréquences bien distinctes. Nous avons observé, en plus des ondes élastiques longitudinales de compression classiques de la diffusion Brillouin, des ondes acoustiques à 350 MHz se propageant dans le gaz et générées par le pied évanescent optique. Grâce au pied évanescent, une partie de la lumière interagit avec le gaz et génère une onde acoustique dont la fréquence dépend de la vitesse du son dans le gaz et de l'indice effectif du mode optique fondamental (fig2 (a)) [4].

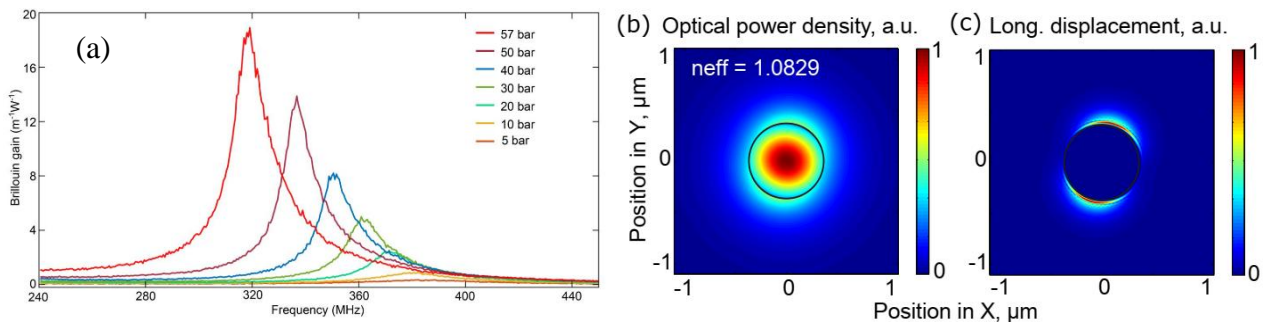


Figure 2. (a) spectre de diffusion Brillouin dans le gaz en utilisant le champ évanescent de la lumière. (b) Calcul de la distribution spatiale du mode optique fondamental à 1550 nm dans une nanofibre de silice de 740 nm de diamètre entourée de 40 bar de CO₂. (c) Calcul de la composante de déplacement longitudinal de la résonance acoustique à 350 MHz.

4. Remerciements

Ce travail a été soutenu par différents programmes ANR, ANR-16-CE24-0010-03, ANR-17-EURE-0002, la région Bourgogne Franche-Comté, le programme Horizon 2020 via le projet ucair.

5. Bibliographie

- [1] L. Tong, *et al.*, Nature 426, 816 2003.
- [2] L. Tong and M. Sumetsky, "Subwavelength and nanometer diameter optical fibers," in Advanced Topics in Science and Technology in China (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010).
- [3] M. Zerbib, *et al.*, "Spin-orbit interaction in nanofiber-based Brillouin scattering," Opt. Express 31, 2023.
- [4] F. Yang, *et al.*, "Large evanescently-induced Brillouin scattering at the surrounding of a nanofiber," Nat Commun 13, 2022.

Approached model of outcoupling arrays for LiDARs applications

Hugo ANTIGNY^{1,2}, Cyrille BARRERA², Kyllian MILLARD², Evgueni POPOV¹, Anne-Laure FEHREMBACH¹

¹ : Aix Marseille Université, CNRS, Centrale Marseille, Institut Fresnel UMR 7249

² : Steerlight, 38000 Grenoble

Contact: hugo.antigny@fresnel.fr

Abstract

Optical Phased Arrays (OPAs) are a promising solution for silicon photonics-based LiDAR systems, enabling compact, fast, and fully solid-state 3D beam steering. The design of efficient photonic antennas, acting as out-coupling gratings, is crucial to optimize the longitudinal scanning dimension, field of view, and beam divergence and directivity. To improve control over these optical properties, we investigate a perturbative analytical approach for modeling the resonant behavior of subwavelength periodic gratings used in OPA emitters.

1. Context

Light Detection And Ranging (LiDAR) is a ranging technology that operates using lasers, offering a method analogous to Radio Detection and Ranging (RADAR). By measuring the round-trip time of a light pulse emitted toward a scene, LiDAR enables the detection and mapping of that environment. The key distinction between these two technologies lies in their operational spectral ranges; LiDAR uses wavelengths ranging from several hundred nanometers to a few micrometers, as opposed to the radio waves used in RADAR. The shift in wavelength allows LiDAR to achieve significantly higher ranging resolution while compact devices can be engineered to operate beyond the conventional diffraction limit, making it essential for applications such as robotics, target tracking and autonomous vehicles. STEERLIGHT proposes a full solid-state LiDAR solution based on Optical Phased Arrays (OPA) to answer industrial needs. Optical Phased Array (OPA) on a photonic silicon platform constitutes a promising solution by being compact, robust against vibrations and by providing a targeting scan at a competitive cost. Photonic antennas are the part of the OPA responsible for the light extraction.

2. Method

We present a compact perturbative framework to analyze out-coupler grating structures. Starting from the Maxwell equations, the field is expanded in a Floquet–Bloch series and coupled via the Fourier harmonics of the permittivity. For a single resonant order, the theory predicts analytical shifts of the propagation constant and radiation linewidth of the leaky mode and gives explicit formulas for the decoupled and coupled field components. For the case of two resonant orders, the model captures bandgap opening, mode splitting. Gap width and linewidth are shown to depend on the permittivity Fourier amplitudes and modal overlap integrals.

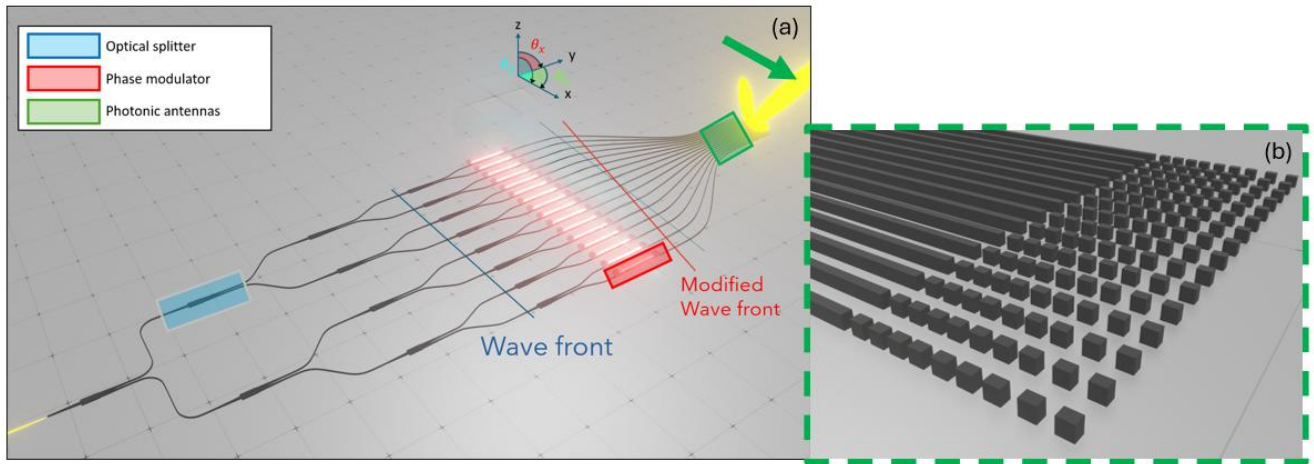


Figure 1. (a) Diagram of an OPA composed of optical splitter (in blue), phase modulators (in red) and optical antennas array (in green). (b) Zoom in on photonic antennas, represented by simple periodic structure. [5]

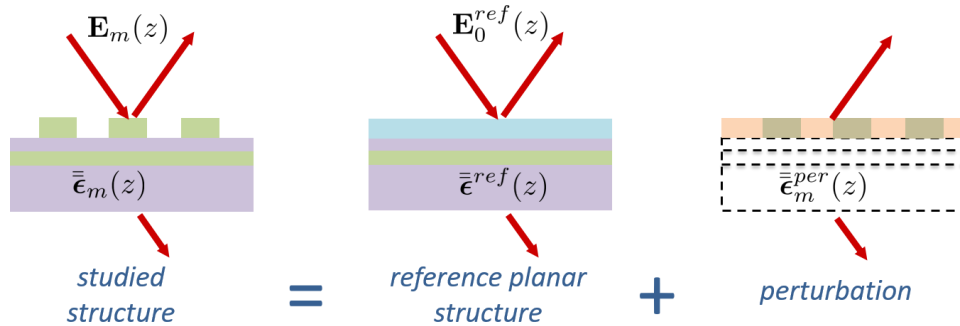


Figure 2. Decomposition of the studied structure in the approached model

6. Bibliography

- [1] **Y. Shuai, Z. Zhou, and H. Su**, "Toward practical optical phased arrays through grating antenna engineering", in *Photonics*, MDPI, vol. 10, 2023, p. 520.
- [2] **Wang, Jinyu, et al.** "Beam steering technology of optical phased array based on silicon photonic integrated chip." *Micromachines* 15.3 (2024): 322.
- [3] **M. Raval, C. V. Poulton et M. R. Watts**, "Unidirectional waveguide grating antennas with uniform emission for optical phased arrays", *Optics letters*, t. 42, no 13, p. 2563-2566, 2017.
- [4] **Fehrembach, A. L., Gralak, B., & Sentenac, A.** (2018). Vectorial model for guided-mode resonance gratings. *Physical Review A*, 97(4), 043852.
- [5] **C. Barrera**, « Conception, caractérisation et intégration d'un système de balayage laser en photonique sur silicium pour des applications de détection lidar à 1.55 μm », thèse de doct., Université Paris-Saclay, 2023.

Vers des cavités à miroirs de Bragg dans des guides d'ondes en niobate de lithium sur film mince

T. Dutron¹, A. De Sousa Lopes Moreira¹, N. Benon¹, N. Courjal¹, D. Belharet¹,
T. Baron² and M. Chauvet¹

¹ : Université Marie et Louis Pasteur, CNRS, institut FEMTO-ST, F-25000 Besançon, France,

² : Université Marie et Louis Pasteur, SUPMICROTECH, CNRS, institut FEMTO-ST, F-25000
Besançon, France

Email : theo.dutron@femto-st.fr

Résumé

Ce travail présente la conception et la fabrication de miroirs de Bragg intégrés dans des nanoguides d'ondes en niobate de lithium sur film mince (TFLN), destinés à la réalisation de cavités résonantes. Les étapes de fabrication de réseaux de Bragg de premier ordre, optimisés pour les longueurs d'onde télécom, sont décrites. Les performances du filtre sont analysées en fonction des paramètres géométriques du guide d'ondes et du réseau, ainsi que de la polarisation du mode guidé. La réponse spectrale des cavités formées entre deux réseaux de Bragg est également examinée.

1. Introduction

Le niobate de lithium (LiNbO_3) est un matériau clé pour les dispositifs photoniques en raison de sa large fenêtre de transparence et de ses remarquables propriétés électro-optiques et non linéaires. L'émergence de films minces de LiNbO_3 , obtenus par découpe ionique, permet désormais la fabrication de dispositifs compacts et performants, compatibles avec une intégration à grande échelle [1].

Dans ce contexte, le projet national français NanoFiLN, financé par le PEPR électronique, vise à établir une filière technologique académique autour des puces optiques à base de TFLN. Parmi les dispositifs développés dans le cadre du projet, les réseaux de Bragg [2],[3] présentent un grand intérêt. Ils offrent des fonctionnalités essentielles pour la réalisation de filtres spectraux sélectifs, de capteurs, de dispositifs de multiplexage, ou encore de cavités optiques à haut facteur de qualité.

Dans ce travail, la micro-structuration du LiNbO_3 est exploitée pour réaliser des réseaux de réflexion efficaces dans la bande télécom.

2. Fabrication des miroirs de Bragg

Les miroirs de Bragg sont réalisés par structuration périodique d'une résine électrosensible déposée sur des guides d'ondes en TFLN, à l'aide de la lithographie par faisceau d'électrons. Cette résine sert ensuite de masque pour la gravure du guide par *Reactive Ion Etching* (RIE), permettant de transférer le motif avec une grande précision (Figure 1).

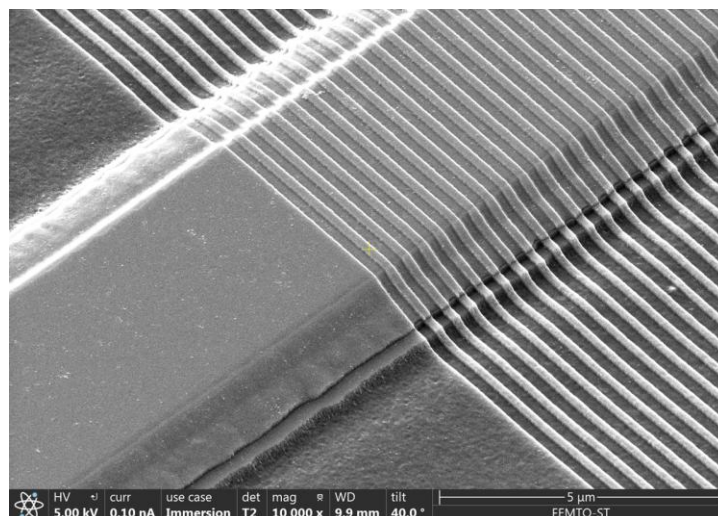


Figure 1. Miroir de Bragg obtenu par un motif périodique en résine électrosensible sur un guide d'ondes sur TFLN de dimension $3 \times 0,6 \mu\text{m}^2$.

3. Résultats

Les spectres de transmission mesurés (Figure 2a), permettent d'extraire la longueur d'onde centrale (λ_{Bragg}), la largeur de bande ($\Delta\lambda$) et le taux d'extinction sont extraits. Ces paramètres ont été étudiées analytiquement et expérimentalement en fonction de la largeur du guide d'ondes, de la profondeur de gravure, de la période et de la longueur du réseau.

Nous montrons que les caractéristiques du réseau peuvent être ajustées pour obtenir des réponses spectrales spécifiques. Des courbes d'étalonnage (Figure 2b), en bon accord avec la théorie, sont obtenues, permettant une conception fine de futurs miroirs de Bragg destinés à la formation de cavités.

Des premières mesures de pics de résonance de cavités à miroirs de Bragg sont également présentées, ainsi que des mesures d'intervalle spectral libre.

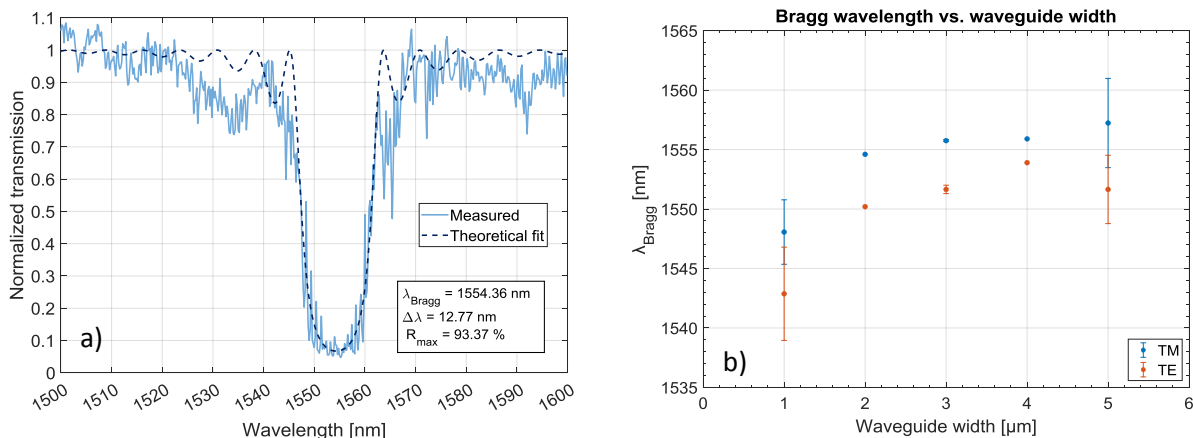


Figure 2. (a) Spectre en transmission normalisé expérimental et théorique d'un miroir de Bragg sur couche mince de LiNbO_3 . (b) Evolution de la longueur d'onde centrale du miroir de Bragg en fonction de la largeur du guide d'onde selon la polarisation incidente.

4. Conclusion

Ces travaux démontrent la faisabilité de miroirs de Bragg intégrés dans des guides d'ondes en niobate de lithium sur film mince, avec des performances ajustables par conception. Les résultats expérimentaux valident les modèles théoriques et ouvrent la voie à la réalisation de cavités résonantes compactes et performantes pour des applications en photonique intégrée, telles que l'amplification d'effets non-linéaires comme la génération de seconde harmonique.

5. Remerciements

Ce travail est financé par le projet NanoFiLN (Grant No. ANR-23-PEEL-0004), l'école doctorale EIPHI (Contrat No. ANR-17-EURE-0002), et le réseau français RENATECH via la plateforme technologique FEMTO-ST.

6. Bibliographie

- [1] D. Zhu et al., "Integrated photonics on thin-film lithium niobate," *Adv. Opt. Photon.*, vol. 13, no. 2, pp. 242–352, juin 2021, doi: 10.1364/AOP.411024.
- [2] A. Ashkin, G. Boyd, et J. Dziedzic, "Resonant optical second harmonic generation and mixing," *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 2, no. 6, pp. 109–124, juin 1966, doi: 10.1109/JQE.1966.1074007.
- [3] F. Kehl, D. Bischof, M. Michler, M. Keka, et R. Stanley, "Design of a Label-Free, Distributed Bragg Grating Resonator Based Dielectric Waveguide Biosensor," *Photonics*, vol. 2, no. 1, pp. 124–138, mars 2015, doi: 10.3390/photonics2010124.

Génération de seconde harmonique par quasi accord de phase dans des nanoguides de niobate de lithium

N. Benon¹, A. De Sousa Lopes Moreira¹, T. Dutron¹, L. Gauthier-Manuel¹, M. Chauvet¹
¹ : université Marie et Louis Pasteur, CNRS, institut FEMTO-ST, F-25000 Besançon, France
 nathanaell.benon@femto-st.fr

Résumé

Nous présentons des résultats obtenus en génération de seconde harmonique par quasi accord de phase en simple passage dans des nanoguides en films minces de niobate de lithium (LiNbO₃) périodiquement polés. Les processus de fabrication et de poling du matériau permettant d'observer cette génération de seconde harmonique sont également détaillés.

1. Introduction

Le niobate de lithium (LN), avec sa grande gamme de transparence dans le visible et le moyen IR et ses coefficients non linéaires forts ($d_{33} = 27\text{pm/V}$), est un matériau de choix pour l'exploitation d'effets non linéaires optiques. Des efficacités de conversion de fréquence records sont notamment accessibles dans ce matériau dues à son développement en films minces (TFLN). Ces conversions efficaces [1] sont atteintes dans des guides de section transversale proche du μm^2 . Notre travail s'inscrit dans ce cadre et vise au développement d'un secteur technologique français sur le TFLN pour des applications optiques.

2. Description de la structure étudiée

Les structures étudiées sont des nanoguides en LN, dont la section typique est présentée figure 1 : un guide de 600nm d'épaisseur, en géométrie rib ou ridge, posée sur une épaisseur de deux microns de silice ; l'ensemble repose sur un substrat en silicium. Pour obtenir le quasi accord de phase (QPM), il est nécessaire d'inverser périodiquement l'axe cristallographique du matériau (PPLN). Ce poling consiste à appliquer un champ électrique intense à l'aide d'électrodes de période adéquate. Plusieurs méthodes sont suivies pour mettre au point ce procédé.

Ainsi le poling peut être réalisé avant ou après la gravure des guides par RIE. Des pertes de propagation de 0.6dB/cm au plus bas sont obtenues.

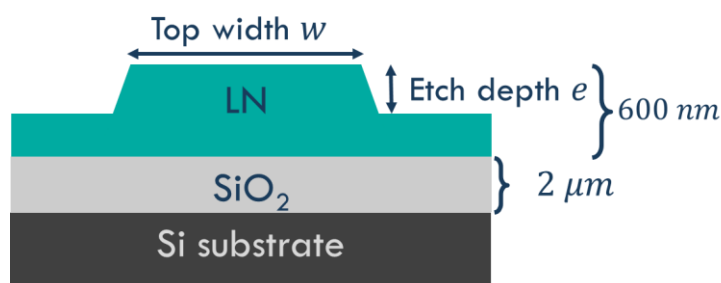


Figure 1. Géométrie des guides d'onde étudiés

3. Résultats

De la SHG en QPM a été observée dans nos puces TFLN, pour des guides ayant une largeur de $2\mu\text{m}$ à $3\mu\text{m}$. Les meilleures efficacités de conversion mesurées sont proches de $3000\%/W/\text{cm}^2$. Un exemple de réponse spectrale est présenté figure 2. Des travaux sont en cours pour optimiser les étapes de fabrication. Il est aussi prévu d'insérer ces guides PPLN dans une cavité résonante afin d'accroître davantage l'efficacité du processus non linéaire.

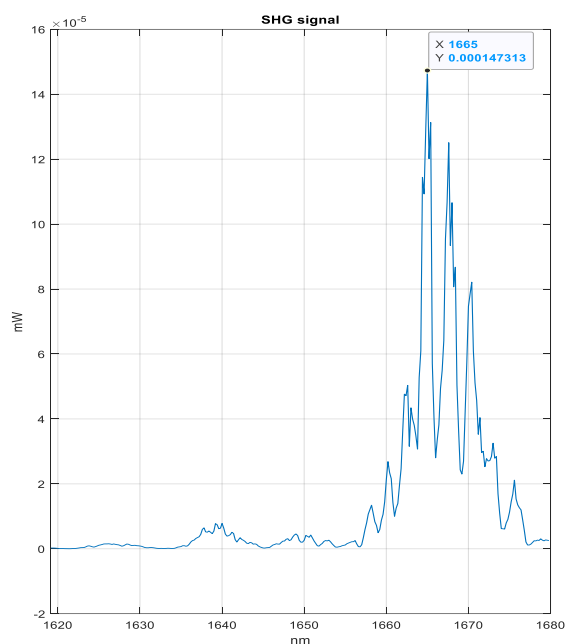


Figure 2 : signal SHG obtenu dans un guide de $2.5\mu m$, pour une puissance de pompe de $230\mu W$

4. Conclusion

Dans cette contribution, nous exposons nos résultats pour la génération de seconde harmonique par quasi accord de phase dans les films minces de niobate de lithium.

5. Remerciements

Les auteurs remercient l'Agence Nationale de la Recherche sous le projet NanoFiLN (ANR-23-PEEL-0004), la plateforme EQUIPEX+ SMARTLIGHT (ANR-21-ESRE-0040), NANOFUTUR (ANR-21-ESRE-0012), et l'EIPHI Graduate School (ANR-17-EURE-0002). Ce travail a été soutenu par le réseau RENATECH, la centrale technologique MIMENTO, et la Région Bourgogne Franche-Comté.

6. Bibliographie

[1] Boes et al., 'Lithium niobate photonic: Unlocking the electromagnetic spectrum', Science, 379, Issue 6627 (2023)

Instabilité de polarisation dans des fibres à maintien de polarisation à dispersion normale (PM-ANDi) et son impacte sur la génération de supercontinuum

R.Morel¹, G. Fanjoux¹, J.M.Dudley¹, T.Sylvestre¹

¹ : Institut FEMTO-ST, CNRS, Université Marie et Louis Pasteur, Besançon, France
 romain.morel@femto-st.fr

Résumé : On étudie l'impact du maintien de polarisation (PM) dans les fibres (ANDi) sur la stabilité des continuums générés en définissant une limite de durée d'impulsion de pompage dans le cas d'utilisation le plus défavorable et on compare cette limite aux fibres ANDi non PM.

1. Introduction

La génération de supercontinuum dans les fibres (ANDi) a fait l'objet de nombreuses études dans les deux dernières décennies. En effet ces dernières répondent à un besoin croissant de source laser à large bande spectrale ultra-stable. Ce type de source a déjà été très étudié dans la littérature [1] démontrant que les performances promises sont atteintes dans des conditions de pompages bien précises, limitées principalement par l'apparition d'instabilité de polarisation [2]. C'est dans ce contexte que sont apparues les fibres (PM-ANDi) censées permettre de supprimer ces instabilités [3].

2. Propriété linéaire de la fibre à l'étude

La fibre étudiée, issue du projet européen VISUAL, est une fibre à cristaux photoniques optimisée pour un pompage à 1030 nm par laser ytterbium. La figure 1.a montre une augmentation exponentielle des pertes de confinement au-delà de 1,3 μm . La figure 1.b indique une biréfringence de phase d'environ 2×10^{-4} à 1030 nm, et la figure 1.c situe le minimum de dispersion près de 1000 nm.

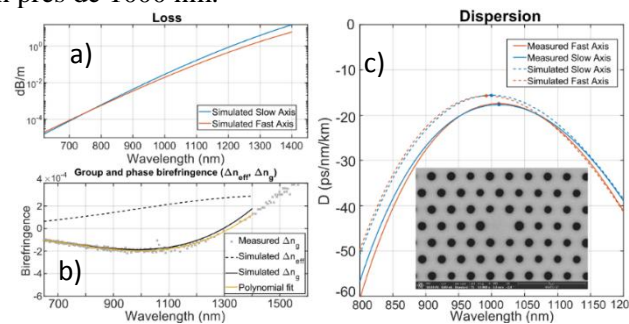


Figure 1 Présentation fibre VISUAL

3. Instabilité de modulation de polarisation (PMI) en régime picoseconde

La fibre a été pompée figure 2 à l'aide d'un laser Nd:YAG délivrant des impulsions de 36 ps à 200 kHz avec une puissance crête de 32 kW. La polarisation d'entrée a été ajustée à l'aide d'une lame demi-onde. Sur l'axe lent, deux bandes d'instabilité de modulation apparaissent à 65 THz de la pompe, en bon accord avec la prédiction théorique [4] ($\Delta f \approx 62$ THz). Ces résultats montrent que des instabilités de modulation peuvent encore se manifester sur l'axe lent, même dans les fibres PM-ANDi.

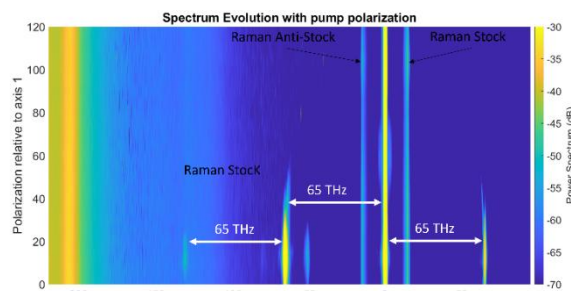


Figure 2 PMI en régime picoseconde

4. Impacte de la PMI sur la génération de supercontinuum en régime femtoseconde

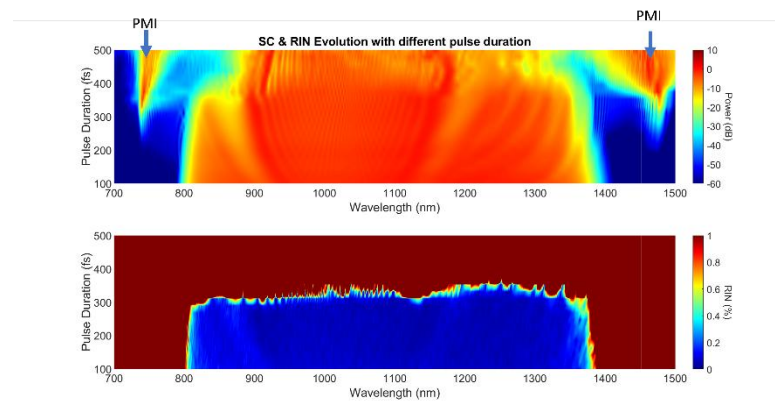


Figure 3 Impacte sur la génération de supercontinuum

Nous avons étudié numériquement l'impact des bandes de PMI sur la stabilité du supercontinuum en régime femtoseconde, en analysant le RIN (relative intensity noise) de 20 impulsions gaussiennes d'une puissance crête de 30 kW et avec un bruit simulé d'un photon par mode (OPPM). Les résultats montrent qu'au-delà de 300 fs, le bruit augmente fortement, soulignant l'importance du choix de l'axe de pompage. En effet, en pompant sur l'axe rapide, les bandes de PMI disparaissent et le continuum reste stable. Dans le cas des fibres non PM, la limite apparaît vers 200 fs [2], cela confirme l'intérêt des fibres à maintien de polarisation, même dans leur condition d'utilisation la plus défavorables

4. Conclusion

On a donc montré que pour une utilisation optimale des fibres PM-ANDi, il est primordial de bien connaître les axes de cette dernière. Cela devient particulièrement critique quand il s'agit de pomper la fibre avec des pulses d'une durée supérieure à 300 fs.

5. Remerciement

Ce travail a reçu un financement de l'Union européenne dans le cadre du programme de recherche et d'innovation Horizon, au titre des conventions de subvention n° 101135904 (projet VISUAL), de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR-20-CE30-0004), de la Région Bourgogne-Franche-Comté, ainsi que de l'Institut Universitaire de France (IUF).

6. Bibliographie

- [1] A.M. Heidt et al. "All-Normal Dispersion Fiber Supercontinuum: Principles, Design, and Applications of a Unique White Light Source. In: Alfano, R.R. (eds) The Supercontinuum Laser Source, Springer, pp 299–341 (2022).
- [2] Bravo Gonzalo, I., Engelsholm, R.D., Sørensen, M.P. *et al.* Polarization noise places severe constraints on coherence of all-normal dispersion femtosecond supercontinuum generation. *Sci Rep* **8**, 6579 (2018).
- [3] E. Genier et al., "Ultra-flat, low-noise, and linearly polarized fiber supercontinuum source covering 670–1390 nm," *Opt. Lett.* **46**, 1820 (2021).
- [4] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, 5th ed. (Academic Press, Oxford, 2013).

Photonic Step Ladder Sensors

E. Abdelghaffar¹, A. Akjouj², H. Al Wahsh³, Y. Pennec² & L. Dobrzynski²

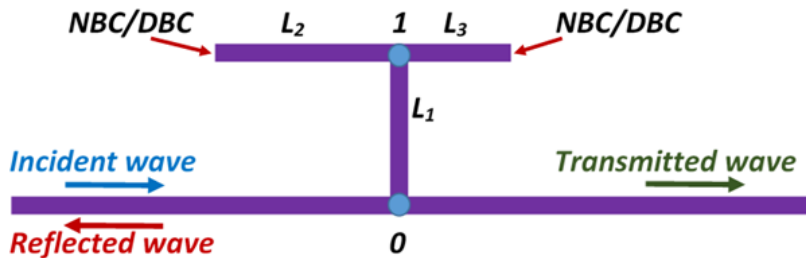
¹Electrical Engineering Department, Faculty of Engineering Benha University, Shoubra 11629 Cairo, Egypt

²Univ. Lille, CNRS, UMR 8520 - IEMN - Institut Electronique, Microélectronique et Nanotechnologie, F59000 Lille, France.

³Engineering Mathematics and Physics Department, Faculty of Engineering, Benha University, Shoubra 11629 Cairo, Egypt

Bound states in the continuum (BICs) have emerged as a significant research focus in photonics due to their exceptionally high quality factor (Q-factor). BICs (also as trapped or confined modes) are not observable from the spectrum due to their non-radiative property. However, they can exist only under a specific choice of materials or geometrical parameters of the structure.

In this work, we analytically show the existence of BICs in a photonic step ladder structure composed of a vertical guide of length L_1 coupled at its base to two horizontal guides of lengths L_2 and L_3 . This cavity is inserted between two semi-infinite waveguides, allowing for the calculation of transmission and reflection coefficients. BICs induce transmission ones in the middle of long-lived resonances. A BIC eigen-function is defined as being strictly localized within a subspace of the finite cavity structure and has no leakage behavior. Its eigen-wave length is within the state continua. Depending on the choice of L_1 , the system exhibits a weak or strong coupling regime, enabling the formation of strongly coupled and decoupled BICs.



**The step ladder cavity
inserted between two
semi-infinite leads**

We provide, by means of the Green's function technique, a full analytical treatment of the eigenmodes, transmission-reflection behavior, and the exact conditions for BIC emergence in the case where the boundary conditions at the end of the stubs L_2 and L_3 are (i) Neumann boundary conditions (NBC) and (ii) Dirichlet boundary conditions (DBC). When the lengths of L_2 and L_3 are commensurate, these two stubs induce BICs. This property enables us to control the resonances by engineering these lengths. The latter is independent of L_1 and the two semi-infinite waveguides, where the cavity structure is integrated. By breaking the BICs conditions, we obtain Fano resonances or EIT resonances exhibiting sharp peaks in the transmission spectra and in the variation of the density of states. The EIT resonance, sensitive to the geometrical parameters of the waveguide, may be used to design a resonant wave sensor with high Q-factor suitable for sensing platforms

Modes de Tamm d'ordre supérieur induits par une couche métallique perforée pour la détection optique

O. Haidar¹, B. Mathmann¹, Y. Dusch¹, M. Boutghatin¹,
E.H. El Boudouti³, G. Lévêque¹, A. Mir², A. Akjouj¹, and A. Talbi¹

¹ : Univ. Lille, CNRS, Centrale Lille, Univ. Polytechnique Hauts-de-France, UMR 8520-IEMN, F-59000 Lille, France,

² : Laboratoire d'Optique, du Traitement de l'Information, de Mécanique, d'Énergétique et d'Électronique, Faculté des Sciences, Université Moulay Ismail, B.P. 11201, Zitoune, Meknès, Maroc

³ : Laboratoire de Physique de la Matière et du Rayonnement, Département de Physique, Faculté des Sciences, Université Mohammed Premier, 60000 Oujda, Maroc.

oumaima.haidar@univ-lille.fr

Résumé

Les modes de Tamm sont des modes confinés entre un métal et un miroir de Bragg distribué (DBR). Ils présentent l'avantage d'être accessibles à incidence normale, sans nécessiter d'éléments de couplage tels que les prismes. Dans ce travail, nous observons expérimentalement des modes de Tamm d'ordre supérieur en introduisant une cavité entre le métal et le réseau de Bragg. Ces modes présentent une forte localisation de l'énergie à l'intérieur de la cavité, ce qui les rend prometteurs pour les applications de détection optique, en raison de leur confinement spatial élevé et de leur facteur de qualité important. Afin d'améliorer l'adaptabilité à la détection d'indice de réfraction tout en préservant les conditions d'excitation des modes de Tamm d'ordre supérieur, nous proposons une nanostructuration simultanée de la couche d'or et de la cavité. Cette approche permet de maintenir une forte réflectivité de la couche métallique, assurant la préservation des modes de Tamm tout en augmentant la sensibilité de la structure pour les applications de détection.

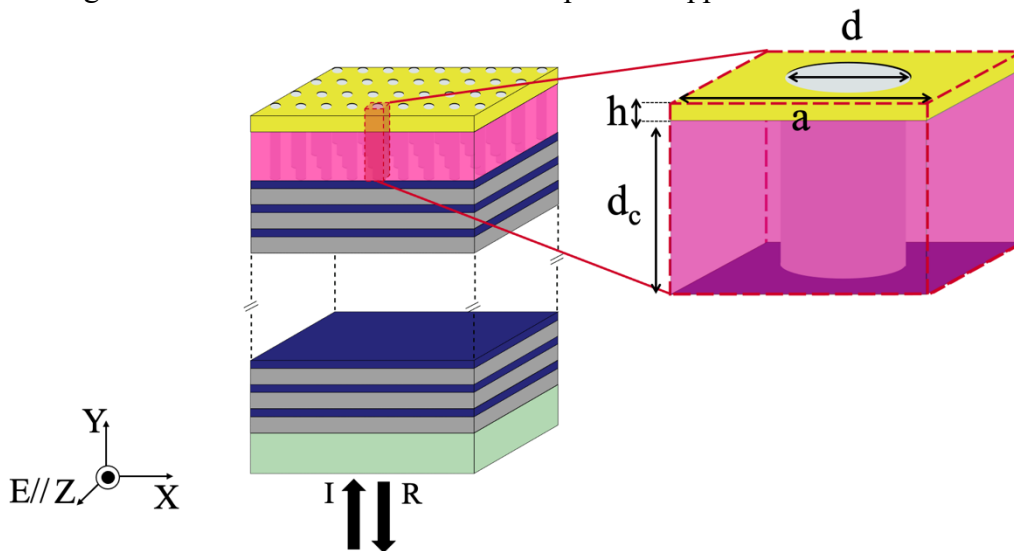


Figure 1. Représentation 3D de la structure de Tamm avec des trous de diamètre d dans la couche d'or et la couche de cavité. L'encadré montre la cellule unitaire carrée, de largeur a , mettant en évidence la couche d'or et la couche de cavité.

Bibliographie

- [1] **M. Kaliteevski et al.**, *Tamm plasmon-polaritons: Possible electromagnetic states at the interface of a metal and a dielectric Bragg mirror*, **Phys. Rev. B**, vol. 76, pp. 165415, 2007.
- [2] **L. Li and H. Hao**, Evolution of high-order Tamm plasmon modes with a metal–PhC cavity, **Sci. Rep.**, vol. 12, pp. 14921, 2022.

Affiche GT3

Mapping the magnetic response of materials on a local scale using magneto-resistive sensors

A. Solignac¹, W. Benmessaoud¹, J. Moulin¹, F. Hadadeh¹, A. Doll¹, E. Paul¹, M. Pannetier-Lecoeur¹, N. Segeeva-Chollet², C. Fermon¹

¹ SPEC, CEA, CNRS, Université Paris-Saclay, CEA Saclay, 91191 Gif sur Yvette Cedex, France

² CEA LIST, 91191 Gif-sur-Yvette, France
aurelie.solignac@cea.fr

The characterization of the magnetic properties of materials at the local scale is important for applications such as in situ monitoring, non-destructive testing or nanometrology. Indeed, for some materials that exhibit a magnetic response and in particular steels, mechanical and magnetic properties are correlated via the microstructure. The measurement of magnetic properties at the local scale could therefore allow access to the mechanical properties of materials in a non-destructive way and a better understanding of their microstructure. In order to obtain additional contrasts, it is possible to use the mapping of the frequency response to the application of an alternating magnetic field (magnetic susceptibility).

Two magnetic mapping tools, at two scales, submillimeter and submicrometer, are developed in the laboratory by combining magnetoresistive magnetic sensors [1] and a scanning system. The use of the giant and tunnel magnetoresistance effect, based on spin electronics, allows the development of very sensitive magnetic sensors whose size can be submicron. These sensors allow to detect magnetic fields emitted by the sample surface in a quantitative way, with a detectivity of the order of $\text{nT}/\sqrt{\text{Hz}}$, in a topography-decolored way, and on a large frequency range (DC to the hundred MHz).

In order to achieve micrometer and submicrometer resolution, the GMR sensor is integrated into a flexible cantilever (Figure 1 left) and combined with a local probe microscope. On a larger scale, the tool working with sub-millimeter resolution is composed of a 3D probe integrating GMR sensors mounted in Wheatstone bridge and gradimeter to eliminate temperature and environmental drift, and positioned on a pyramidal support (Figure 1 right), and a motorized stage. The three components of the field can be extracted and allow a 3D mapping of the fields emitted by the material surface.

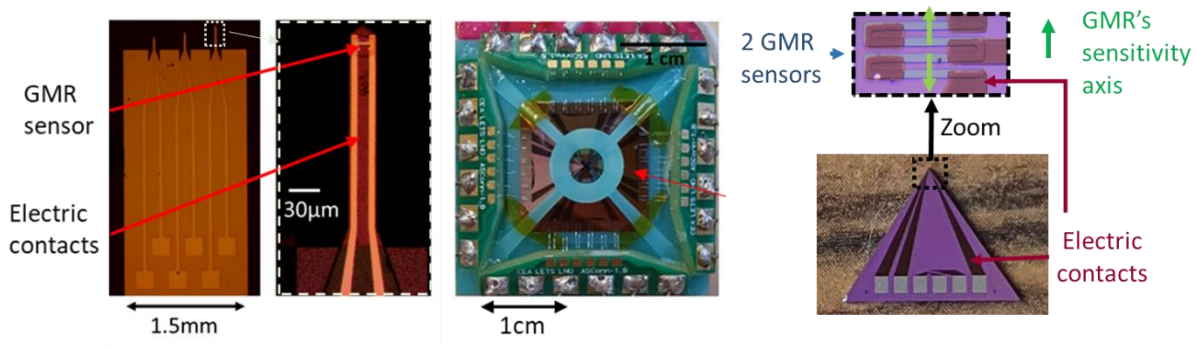


Figure 1. (Left) Atomic force microscope (AFM) support composed of 3 flexible cantilevers ($1\mu\text{m}$ Si_3N_4) on which are integrated a GMR sensor. (Right) 3D probe composed of 4 GMR dies positioned on a pyramidal support.

The aim will be now to develop modeling tools able to reconstruct the magnetic properties of microstructured and inhomogeneous samples from the cartographies of the three components of the stray field emitted by the sample.

Acknowledgements

We acknowledge the following organisms for funding: the CEA for the internal funded projects MI-MOSA and CALM and the PhD Grant “Phare Amont-Aval”, the Swiss National Science Foundation (SNSF) for a mobility fellowship (project 165238) to A. Doll, the ANR funding through grant n° ANR-17-CE19-0021-01, the regional French Labex NanoSaclay and Palm for the funded projects CALM and CARTE.

References

- [1] C. Fermon and Marcel Van de Voorde Nanomagnetism: applications and perspectives, Wiley VCH (2017)
- [2] J. Moulin, PhD thesis 2020; <https://theses.hal.science/tel-02976807v1>
- [3] F. Hadadeh, A. Solignac, M. Pannetier-Lecoeur, N. Sergeeva-Chollet and C. Fermon, IEEE Sensors Journal V19, I22 (2019); <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02316945>

Estimation haute-résolution des angles d'arrivées pour les antennes à ondes de fuite à balayage électronique

H. Gazzah

ISEN Yncréa Ouest, L@bISEN/SEACOM, Avenue du champ de manœuvre, 44470 Carquefou.
 houssem.gazzah@isen-ouest.yncrea.fr

Résumé

Nous présentons un algorithme de localisation de sources pour les antennes à ondes de fuite à balayage électronique. De type Root-MUSIC, il assure une estimation des angles d'arrivées : rapide (sans recours à une recherche spectrale), haute-résolution (l'erreur d'estimation est arbitrairement basse lorsque le SNR est arbitrairement élevé) et robuste (le nombre de sources n'a pas besoin d'être exactement connu).

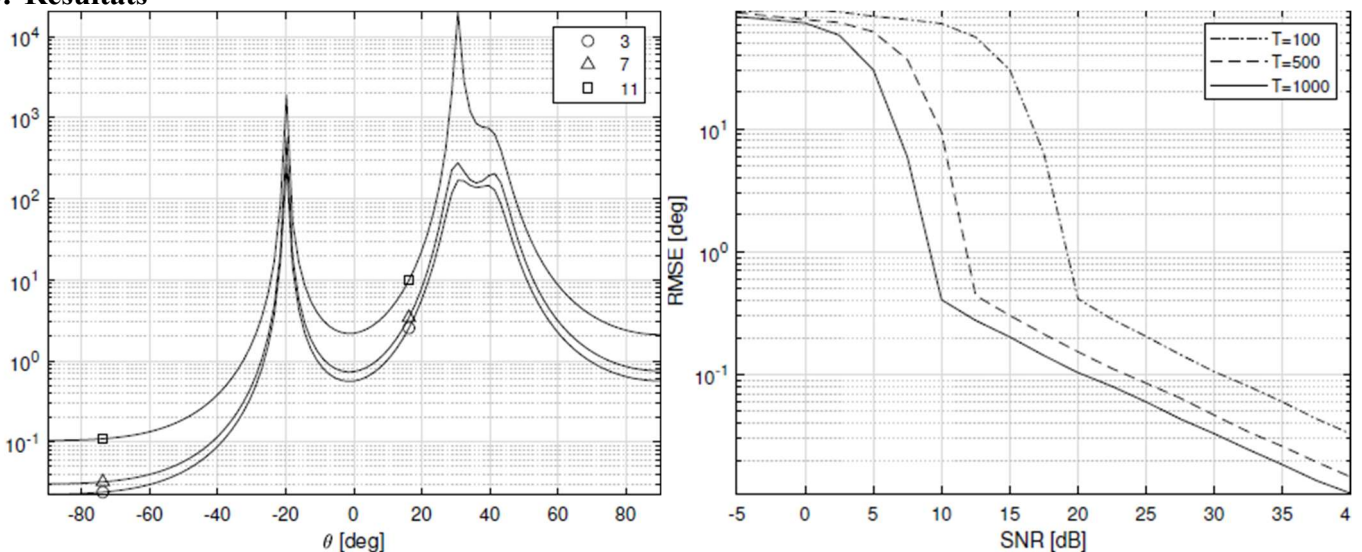
1. Introduction

Les antennes à ondes de fuites deviennent de plus en plus attractives pour les applications de localisation de sources. Celles à balayage électronique offrent la possibilité de concevoir des algorithmes rapides grâce à une structure des données qui fait apparaître des matrices de Vandermonde. L'algorithme qui s'en suit détermine les angles d'arrivées en cherchant les racines d'un polynôme, en contraste avec les algorithmes existants qui doivent maximiser une fonction spectrale de tous les angles d'arrivée possibles.

2. Description de la structure étudiée

Antenne à ondes de fuite à balayage électronique CRLH double-port, 12 cellules, opérant à 2.26 GHz, en présence de 3 sources en champ lointain. Les tests ont été conduits sous forme de simulations Matlab

3. Résultats



L'algorithme est capable de localiser les sources mêmes s'il est mal-informé sur leur nombre exact (7 ou 11 au lieu de 3). L'erreur décroît automatiquement si le temps d'observation et/ou le SNR augmente

4. Conclusion

Un algorithme de localisation de sources pour les CRLH-LWA est présenté, avec des avantages uniques en termes de complexité et de robustesse, qui s'ajoutent aux avantages propres à ce type d'antennes pour les systèmes de localisation

5. Bibliographie

- [1] H. Gazzah, DOA Estimation by Polynomial Rooting for Electronically-Scanned CRLH Leaky-Wave Antennas, *IEEE Tr. Aerospace and Electronic Systems*, accepté.
- [2] H. Paaso et al, Doa estimation using compact crlh leaky-wave antennas: Novel algorithms and measured performance, *IEEE Tr. Antennas and Propagation*, 65(9):4836 – 4849, 2017.

Estimating the radius from a monodisperse collection of randomly oriented non-spherical particles

F. Malaval¹, A. Litman¹

¹ : Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Marseille, Institut Fresnel, Marseille, France
francois.malaval@fresnel.fr

Abstract

Light scattering is a complex process which depends on many parameters, such as the refractive index, the shape, or the size of the scatterers.

In this work, we are mainly interested in the overall shape of a generic particle located in a cloud of identical particles. In the literature, there exist different ways to define such a quantity for non-spherical particles: the gyration radius [1], the volume equivalent radius [2], or the maximum radius [3] for example.

We will derive different estimation methods of the size of a particle from its orientation-averaged Mueller matrix first component, and try to find to which size definition each estimator is linked to.

These methods will be tested on different types of shapes, with data corrupted by noise with different signal to noise ratios.

1. Introduction

The inference of scatterer properties using light scattering is of importance in many domains, like atmospheric sciences [4], biology [5], or astrophysics [6]. When light interacts with a cloud of particles, it will be affected by the particles' concentration, their shapes and constituents.

For homogeneous solid material, the refractive index provides information on the bulk composition and can be deduced using complementary spectroscopic methods. The overall size and shape influence the scattering patterns differently depending on the wavelength of observation. More precisely, the object's dimensions with respect to the wavelength are important [7].

Recent studies have shown that the assumption that the particles are all spherical is not sufficient to totally explain the observed orientation average phase functions. The long-term purpose of this work is to go beyond the spherical approximation and try to estimate the generic shape of a particle from the Mueller matrix, assuming that the particles are all made from the same material, which refractive index is known and can be retrieved by other means. But before being able to retrieve the detailed shape information, it is important to quantify the size, which influences the overall scattering behavior.

2. Size definitions

Before describing any estimator, we should first define the different sizes. When we talk about size, we talk about the size parameter. For a sphere of radius r , the size parameter is defined as:

$$x = \frac{2\pi r}{\lambda}$$

But, for a non-spherical particle, the radius is not defined anymore. We have to come up with a new definition. Different possible definitions for the "radius" of a non-spherical particle exist. Here, we will focus on the following ones: the gyration radius, the maximal radius, the surface equivalent radius, the projected area equivalent radius or, the volume equivalent radius.

3. Different radii estimators from the phase function

The input data is the Mueller matrix averaged over all possible orientations. In the case of an unpolarized incident light, it corresponds to the orientation averaged phase function. We will suppose that the refractive index is already known. To estimate the radius, different methods will be derived based on

different approximations, and tested under different signal to noise ratio.

When the scatterer is small or large compared to the wavelength, approximations can be made which facilitate the expression of light scattering, such as Rayleigh scattering or Geometrical Optics. From these expressions, relations between the phase function and some different radii can be derived. We will use these estimators out of their region of strict validity to obtain estimations of the radius.

As the shape of the particle is not preponderant in the phase function, it is possible to find the sphere whose radius reproduces the best our phase function. This gives us another estimation of the radius.

Finally, the recent analysis of q-space demonstrates that it could be linked to some properties of the particle under study [8]. Especially, in this new representation, the first drop appears when the q variable satisfies the equation: $qr = 1$. This provides another way to estimate a radius.

These estimators will be tested on different shapes. First spheres using Mie theory [9] will be considered. Then, spheroids (with size parameters smaller than 30 approximately) will be studied thanks to a T-matrix code [10]. Finally, different fractal aggregates have been simulated using a finite element code [11] and will be analyzed.

4. Special thanks

This project is funded by the “France 2030” investment plan managed by the French National Research Agency (ANR-21-ESRE-0002). It also received funding from the ERC Advanced Grant DUST2PLANET (No. 240676) and from the Institut Origines – From Planets to Life at Aix-Marseille University

5. Bibliography

- [1] Yon, J., Rozé, C., Girasole, T., Coppalle, A., & Méès, L. (2008). Extension of RDG- FA for Scattering Prediction of Aggregates of Soot Taking into Account Interactions of Large Monomers. *Particle & Particle Systems Characterization*, 25(1), 54-67.
- [2] Muñoz, O., Moreno, F., Guirado, D., Dabrowska, D. D., Volten, H., & Hovenier, J. W. (2012). The Amsterdam–Granada light scattering database. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 113(7), 565-574.
- [3] Saito, M., Yang, P., Ding, J., & Liu, X. (2021). A comprehensive database of the optical properties of irregular aerosol particles for radiative transfer simulations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 78(7), 2089-2111.
- [4] Martín, J. C. G., Guirado, D., Frattin, E., Bermudez-Edo, M., Gonzalez, P. C., Reyes, F. J. O., ... & Muñoz, O. (2021). On the application of scattering matrix measurements to detection and identification of major types of airborne aerosol particles: Volcanic ash, desert dust and pollen. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 271, 107761.
- [5] Bronk, B. V., Druger, S. D., Czege, J., & Van De Merwe, W. P. (1995). Measuring diameters of rod-shaped bacteria in vivo with polarized light scattering. *Biophysical Journal*, 69(3), 1170-1177.
- [6] Tazaki, R., Ginski, C., & Dominik, C. (2023). Fractal aggregates of submicron-sized grains in the young planet-forming disk around IM Lup. *The Astrophysical Journal Letters*, 944(2), L43.
- [7] Mishchenko, M. I. (2006). Scale invariance rule in electromagnetic scattering. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 101(3), 411-415.
- [8] Sorensen, C. M., Heinson, Y. W., Heinson, W. R., Maughan, J. B., & Chakrabarti, A. (2017). Q-space analysis of the light scattering phase function of particles with any shape. *Atmosphere*, 8(4), 68.
- [9] Bohren, C. F., & Huffman, D. R. (2008). *Absorption and scattering of light by small particles*. John Wiley & Sons.
- [10] Somerville, W. R. C., Auguié, B., & Le Ru, E. C. (2016). SMARTIES: User-friendly codes for fast and accurate calculations of light scattering by spheroids. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 174, 39-55.
- [11] Valencia, V. T., Geffrin, J. M., Ménard, F., Milli, J., Renard, J. B., Tortel, H., ... & Laur, V. (2022). Scattering properties of protoplanetary dust analogs with microwave analogy: Aggregates of fractal dimensions from 1.5 to 2.8. *Astronomy & Astrophysics*, 666, A68.

MIMOSA : un nouveau dispositif de mesure de diffraction à Marseille

J.-M. Geffrin, E. Samara, H. Tortel, C. Eyraud, A. Litman
 Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Med, Institut Fresnel, Marseille, France
 Jean-michel.geffrin@fresnel.fr

Résumé

MIMOSA est un nouveau dispositif pour caractériser la diffraction des ondes électromagnétiques dans presque toutes les directions. Il est constitué de deux bras portiques qui déplacent deux antennes sur la sphère qui entoure l'objet étudié. Les deux applications que nous présentons ici sont basées sur l'analogie microonde, à savoir la caractérisation de particules circumstellaires, et la caractérisation de la structure interne des astéroïdes.

1. Introduction

La mesure de diffraction est développée à l'Institut Fresnel depuis plus de vingt ans et nous avons récemment mis en service un nouveau dispositif de mesures. Il s'agit de la plateforme MIMOSA (pour Multi Incidences Multi Orientations Scattering and diffraction Analyzer), dont les capacités sont présentées ci-après.

2. Principales caractéristiques de MIMOSA

Nous avons conçu un dispositif basé sur deux bras portiques (avec la société MVG Industries), chaque bras supporte une antenne et permet les déplacements sur la quasi-totalité de la sphère qui entoure l'objet (figure 1a). Les zones aveugles résiduelles se situent autour du pied au mât, et autour des bras portiques. Un exemple de parcours possibles est représenté figure 1b (en vert : le récepteur qui se déplace sur différents méridiens, en rouge : la source ici fixe). Mais cette source peut également se déplacer sur un méridien qui n'exclut que 40° autour du pied de mât (représenté en bleu). On peut également multiplier les incidences avec des rotations des objets autour d'un axe vertical. Dans le repère de l'objet, on peut ainsi déplacer la source sur toute la sphère, en n'excluant que le voisinage du pôle Sud, zone également inaccessible pour le récepteur. L'autre zone que ne peut pas atteindre le récepteur est un disque d'environ 30° autour de la source. Ce dispositif travaille en mélangeurs déportés et il est équipé d'une chaîne de mesure (Rohde et Schwartz, NSI) sur la bande 2 à 40 GHz.

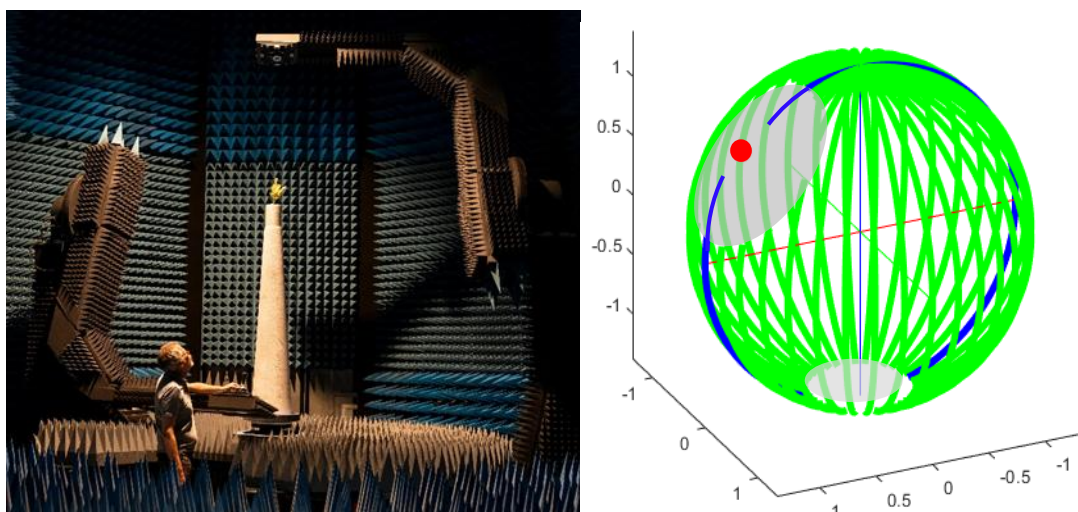


Figure 1. Photographie de MIMOSA et schématisation de la couverture de la sphère par les récepteurs (en vert) pour une source fixe (en rouge)

3. Premières études

La caractérisation de la composition interne des astéroïdes et des comètes est un problème encore mal résolu. Des radars à quelques MHz sont ou seront utilisés pour sonder l'intérieur de ces petits corps du système solaire. Notre objectif est d'aider les planétologues à développer leurs systèmes et à tester leurs algorithmes de caractérisation en utilisant l'analogie microonde [1]. Nous exploitons l'invariance des équations de Maxwell pour « réduire » les astéroïdes et les mettre à l'échelle des gigahertz. Nous mesurons ainsi des analogues décimétriques réalisés en fabrication additive. Les champs en quasi-monostatique présentés sur la figure 2a ont été mesurés avec un analogue de l'astéroïde Dimorphos, cible de la mission HERA de l'ESA.

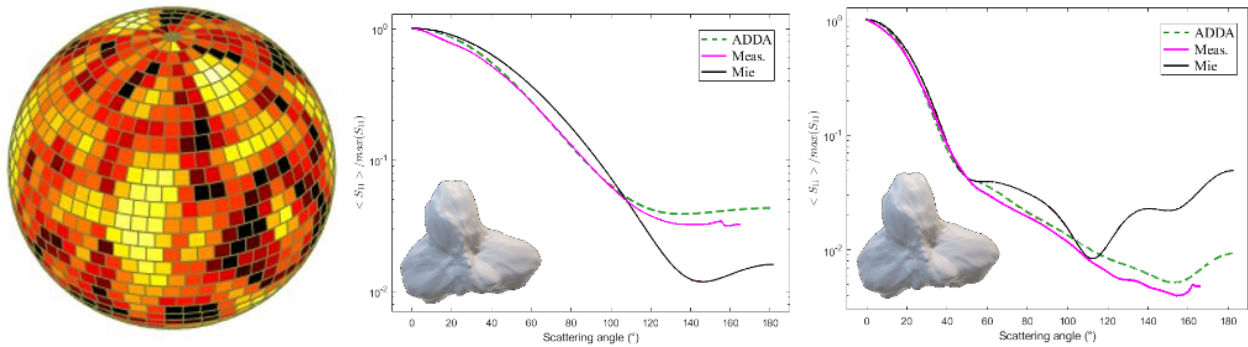


Figure 2 : a) Champ diffracté par un analogue d'astéroïde à 9.5 GHz, b) et c) Fonctions de phase pour un analogue de poussière circumstellaire, mesurés respectivement à 7 et 15 GHz

Nous exploitons également des analogues réalisés en fabrication additive, dans le cadre du projet Dust2Planet, pour aider les astrophysiciens à interpréter les signaux qu'ils observent avec des télescopes ou radiotélescopes. Les objets sont donc « agrandis » pour passer des fréquences optiques ou millimétriques aux GHz et on mesure la diffraction avec un grand nombre d'incidences (typiquement 100, fig. 2 b et c) pour extraire par exemple les fonctions de phase, qui est le premier paramètre de la matrice de Mueller [2]. L'objet test pour ces premières mesures est un analogue de poussière circumstellaire, de permittivité ($\epsilon = 3+0.2j$), voisine de celles des silicates astronomiques dont sont constitués de telles particules.

4. Conclusion

La plateforme MIMOSA est un nouveau dispositif de mesure de diffraction multi-incidences et multi-orientations en chambre anéchoïque qui a été mis en service fin 2024. Notre poster présentera plus précisément ses caractéristiques et son potentiel, et discutera de résultats récemment obtenus.

5. Remerciements

Ce travail a bénéficié d'une aide de l'Etat gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du Plan d'investissement France 2030 portant la référence ANR-21-ESRE-0002. Ce travail a également bénéficié du financement de l'ERC Advanced Grant DUST2PLANET (N°240676) et de l'Institut Origines des Planètes à la Vie d'Aix-Marseille Université. Nos remerciements vont également à Jacques Le Sang de la société MVG pour l'installation et les réglages et la caractérisation géométrique de MIMOSA.

6. Bibliographie

- [1] Vaillon, Rodolphe, et al. "A new implementation of a microwave analog to light scattering measurement device" *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 112.11 (2011): 1753-1760.
- [2] V. Tobon Valencia et al. "Scattering properties of protoplanetary dust analogs with microwave analogy: Aggregates of fractal dimensions from 1.5 to 2.8" *Astronomy & Astrophysics* 666 (2022): A68.

Improved Post-Treatments of Measurements with Missing Angular Data in Scattering

E. Samara, J.-M. Geffrin, A. Litman

Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Med, Institut Fresnel, Marseille, France

Elio.samara@fresnel.fr

Abstract

The characterization of objects through their scattering field is one of the methods used for extracting information about the scatterer. The MIMOSA setup was recently developed and designed for 3D scattering measurements conducted in an anechoic chamber. The processing of the fields measured around the object involves techniques such as drift correction and low-pass filtering. However, mechanical constraints inherent to any setup introduce certain challenges. In this work, we present strategies developed to mitigate these issues and ensure the accuracy and reliability of the measurements.

1. Introduction

In antenna or scattering measurements, mechanical constraints can prevent access to certain angular positions around the antenna or object under test that complicates the data post-processing. To isolate the field scattered by an object, two measurements are acquired: one with the object (total field) and one without it (incident field). Acquired sequentially and potentially over several hours, these measurements are subject to phase and magnitude drifts caused by temporal factors affecting cables and instrumentation. After subtracting the incident field from the total field to obtain the scattered field, drift correction becomes a powerful tool. This is performed using a limited spatial bandwidth criterion in the angular-frequency domain that preserves information and requires no prior knowledge of the object [1]. In a second step, a low-pass filtering method is applied as well in the angular-spectral domain of the measured field. This filtering technique suppresses the remaining high-frequency components that are unlikely to originate from the object under test. Unlike the drift correction, the filter parameters here are directly determined by the physical dimensions of the object [2]. In this work, we present two strategies explored to mitigate the lack of some angular data that could be applied to many measurements.

2. Methodology

The standard Fourier Transform requires uniformly sampled data and becomes unreliable when gaps are present. To address this, we explore two approaches: the Non-Uniform Fast Fourier Transform (NUFFT), which performs Fourier analysis directly on irregular or incomplete datasets [3], and a Fourier Series method that reconstructs the full dataset by interpolating missing values under the assumption of 2π -periodicity. The Non-Uniform Fast Fourier Transform (NUFFT) is an algorithm that performs Fourier transforms on non-uniform or incomplete datasets, approximating results as if the data were fully sampled. Its accuracy depends on the location and distribution of the missing points. The Fourier Series method ensures 2π -periodicity and is implemented via a matrix formulation to compute the Fourier coefficients, enabling interpolation and reconstruction of the complete dataset.

$$E^s(\theta) = \sum_{-K_{\max}}^{K_{\max}} \hat{E}_k^s e^{2j\pi \frac{k}{2\pi} \theta} \quad (1)$$

The estimation of the Fourier Series coefficients \hat{E}_k^s is performed in the least-square sense from the measured scattered field. The missing angular positions are extrapolated in a second step thanks to Eq. 1.

3. Results

Measurements over the 2-18 GHz have been acquired. The drift correction involves transforming the data into the angular-frequency domain via the two previously described approaches. The raw and post-processed measured scattered fields for a metallic sphere with a diameter of 35 mm, shown in the following figure, indicate that both methods are effective, but the NUFFT proved to be more efficient in terms of accuracy, computational cost, and processing time. On the other hand, the NUFFT introduces side effects close to the missing range that can be prejudicial during the low pass filtering step.

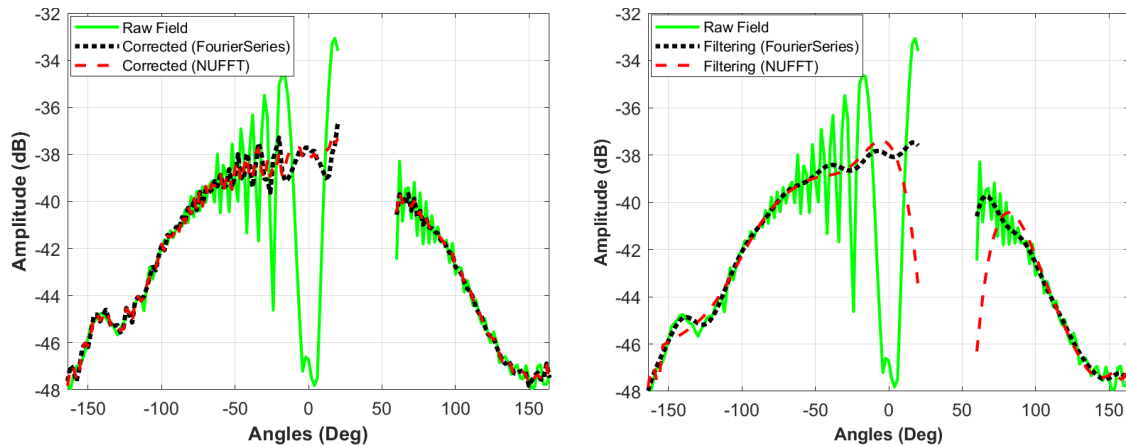


Figure 1 : Amplitude of the measured scattered field (freq = 5 GHz) before and after a) drift correction
 b) low pass filter using the two different approaches

4. Conclusion

This study shows that both the NUFFT and Fourier series methods are effective for processing scattering measurements with missing angular data. The NUFFT proves more efficient for drift correction, offering higher accuracy and reduced computational cost. Conversely, the Fourier series approach provides more stable reconstructions in the case of low-pass filtering, where NUFFT artifacts near the missing ranges can be detrimental. Together, these complementary strategies enhance the robustness and reliability of scattering measurement analysis under practical experimental constraints.

5. Remerciements

This project is funded by the “France 2030” investment plan managed by the French National Research Agency (ANR-21-ESRE-0002). It also received funding from the ERC Advanced Grant DUST2PLANET (No. 240676) and from the Institut Origines – From Planets to Life at Aix-Marseille University.

6. Bibliographie

- [1] C. Eyraud, J.-M. Geffrin, A. Litman, P. Sabouroux and H. Giovannini, Drift correction for scattering measurements, Appl. Phys. Lett., 89, 244104, 2006
- [2] Bucci, O. M., and G. Franceschetti (1987), On the spatial band width of scattered fields, IEEE Trans. Antennas Propag., 35, 1445–1455.
- [3] Potter, Samuel F., Nail A. Gumerov, and Ramani Duraiswami. “Fast Interpolation of Bandlimited Functions.” In 2017 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 4516–20. New Orleans, LA: IEEE, 2017.

Groupe de Réflexion PIPIAC - Propagation d'Incertitudes dans les Problèmes Inverses Appliqués à la Caractérisation

Pilotes : E.Richalot¹, C.Eyraud², N.Malléjac³

Contributeurs : T.Richard³, M.Lambert⁴, A.Litman²

¹ : Laboratoire ESYCOM (UMR-9007), CNRS, Univ. Gustave Eiffel, 77420 Champs-sur-Marne

² : Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Med, Institut Fresnel, Marseille

³ : CEA, DAM, Le Ripault, 37260 Monts

⁴ : Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, CNRS, Laboratoire de Génie Electrique et Electronique de Paris, 91192 Gif-sur-Yvette.

Sorbonne Université, CNRS, Laboratoire de Génie Electrique et Electronique de Paris, 75252 Paris

Emails: elodie.richalot-taisne@univ-eiffel.fr, christelle.eyraud@fresnel.fr, nicolas.mallejac@cea.fr

Résumé

Le groupe PIPIAC s'intéresse aux méthodes permettant d'étudier la Propagation des Incertitudes dans les Problèmes Inverses Appliquée à la Caractérisation. Ce groupe de réflexion dans le cadre du GDR Ondes s'est réuni 4 fois entre 2022 et 2025 et a réuni environ 25 participants (composés d'industriels, d'ingénieurs de grands organismes et d'universitaires). La problématique traitée et les axes de réflexion menés sont présentés ici.

1. Problématique

Le cadre général de la propagation des incertitudes se schématise comme représenté sur la figure 1.

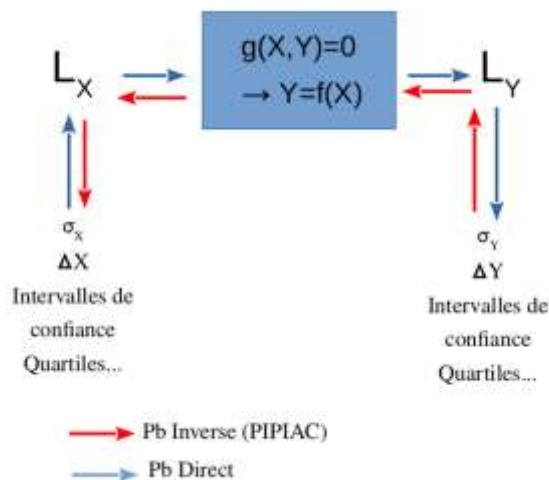


Figure 1. Problématique du traitement des incertitudes pour les problèmes inverses.

Dans le cadre paradigme présenté ci-dessus, le groupe s'intéresse à la détermination des lois de probabilité sur X (données d'entrée) étant données les lois sur Y (données de sortie). La connaissance des méthodes adéquates pour traiter ce problème étant très variables d'une personne à l'autre du groupe, nous avons cherché à dégager une approche pratique de ce problème afin de permettre à chaque participant une

première approche pour déterminer la méthode qui conviendra le mieux à son problème. Certaines méthodes ont été étudiées préférentiellement, en s'appuyant notamment sur des présentations faites par des participants lors des réunions, et des outils ont aussi été mis à disposition des participants. Les méthodes présentées, toujours illustrées de cas applicatifs, ont été mentionnées dans une série de présentations invitées dont la liste est indiquée ci-dessous. Sur le poster, un cas applicatif sera également présenté : le problème d'estimation des incertitudes dans le calcul des propriétés radioélectriques d'un slab à partir de la mesure de ses paramètres S.

2. Liste des présentations invitées

Elodie Richalot, « Caractérisation HyperFréquence de fluides par spectroscopie diélectrique – Capteur microfluidique »

Christelle Eyraud et Nicolas Malléjac, « Caractérisation d'une cible par mesures hyperfréquences »

Benjamin Potelon, « Conception de capteurs électromagnétiques dédiés au suivi de données physiologiques »

Thibaut Charlet, « Caractérisation de matériaux par des mesures de réflexion en champ proche ».

Marc Lambert, « Analyse d'un problème d'inversion paramétrique mal posé - Application au CND par courants de Foucault »

Thomas Houret, « Problèmes inverses sous incertitudes »

Amélie Litman, « Le Slab : Cas d'étude pour explorer les précisions d'estimation via les bornes de Cramer-Rao »

Yanisse Boudrouz, « Détermination, quantification et mitigation des incertitudes dans le cadre de l'imagerie à travers les murs »

Jean-François Giovannelli, « Cartographie micro-onde et quantification d'incertitudes par inversion-segmentation bayésienne et échantillonnage de Gibbs »

Dominique Barchiesi, « Propagation d'incertitudes : modèles de multicouches et de cellule photovoltaïque, applications avec Python »

3. Remerciements

Les auteurs remercient le GDR Ondes pour son appui à l'organisation de ces rencontres, ainsi que l'ensemble des participants aux réunions de ce groupe de réflexion pour les échanges très riches lors de ces réunions, et plus particulièrement ceux ayant présentés leurs travaux.

4. Bibliographie

- [1] [Dominique Barchiesi](#), [Thomas Grosjes](#), Propagation of uncertainties and applications in numerical modeling: tutorial, J Opt Soc Am A Opt Image Sci Vis, 2017, doi: [10.1364/JOSAA.34.001602](https://doi.org/10.1364/JOSAA.34.001602)
- [2] M.Gustafsson, S.Nordebo, Cramér–Rao lower bounds for inverse scattering problems of multilayer structure, Inverse problems, 2006, doi [10.1088/0266-5611/22/4/014](https://doi.org/10.1088/0266-5611/22/4/014) [SMASH](#)
- [3] D.Sjöberg, [C. Larsson](#), Cramér–Rao Bounds for Determination of Permittivity and Permeability in Slabs, IEEE Trans. on MTT, 2011, doi [10.1109/TMTT.2011.2166085](https://doi.org/10.1109/TMTT.2011.2166085)
- [4] T. Benoudiba—Campanini, Approche parcimonieuse pour l'imagerie 3D haute résolution de surface équivalente radar, Thèse de Doctorat, 2018
- [5] J.Boissy, Cartographie micro-onde et quantification d'incertitudes par inversion-segmentation bayésienne et échantillonnage de Gibbs, Thèse de Doctorat, 2022
- [6] A.Birolleau, Résolution de problème inverse et propagation d'incertitudes : application à la dynamique des gaz, compressibles, Thèse de Doctorat, 2014

Co-conception optique/réseaux de neurones pour une caméra préservant la vie privée

M. Dufraisse¹, M. Carvalho³, P. Trouvé-Peloux¹, Jean-Baptiste Volatier², F. Champagnat¹

¹ : ONERA-DTIS, Université Paris-Saclay, Palaiseau, France

² : ONERA-DOTA, Université Paris-Saclay, Palaiseau, France

³ : Upciti, Montreuil, France

Résumé

Nous présentons nos travaux autour de l'optimisation conjointe des paramètres d'une optique et d'un réseau de neurones pour une caméra d'analyse de scènes urbaines à partir d'images volontairement dégradées pour préserver la vie privée.

1. Introduction

La co-conception permet de concevoir simultanément une optique et un traitement en optimisant les paramètres de ces deux éléments pour maximiser la qualité du résultat obtenu en bout de chaîne. Lorsque le traitement utilisé est un réseau de neurones, une simulation optique dérivable permet d'optimiser simultanément les paramètres d'un réseau de neurones et ceux de l'optique [Elmalem2018]. Cela permet la co-conception d'une optique et d'un réseau de neurones à l'aide d'une base de données d'exemples.

Nous présentons le principe de cette approche de co-conception, les outils de simulation développés à l'ONERA permettant de la réaliser et une application dans le cadre de la co-conception d'une caméra préservant la vie privée.

2. Outils pour la co-conception optique/réseaux de neurones

La co-conception optique / réseaux de neurones repose sur une modélisation fine et différentiable de l'ensemble de la chaîne allant de l'image idéale, à la sortie du réseau de neurones de traitement, en passant par l'image acquise par la caméra. Pour cela, il existe différents modèles permettant de simuler la réponse impulsionnelle d'une optique ainsi que son gradient par rapport aux paramètres d'intérêt. Il peut s'agir simplement de l'optique de Fourier, ou bien du tracé de rayon différentiable [Volatier2024]. Nous avons proposé d'ajouter à ces modèles optiques un modèle photométrique qui tient compte de l'influence de l'ouverture de la caméra sur la qualité des images, ce paramètre permettant notamment de contrôler le compromis entre aberration (notamment la défocalisation) et bruit [Dufraisse2024].

3. Applications à la co-conception d'une caméra préservant la vie privée

Nous sommes aujourd'hui entourés de systèmes d'imagerie qui réalisent des tâches complexes d'analyse du contenu des images notamment à l'aide de réseaux de neurones (segmentation sémantique, estimation de pose, détection d'actions). Cependant leur déploiement dans l'espace urbain est limité par les risques qu'ils posent pour le respect de la vie privée. Une méthode pour offrir de meilleures garanties pour la vie privée consiste à utiliser des images suffisamment dégradées pour empêcher la reconnaissance des individus [Hinijosa2022]. La conception d'une telle caméra dont la qualité image est volontairement dégradée tout en maintenant une tâche d'analyse performante relève typiquement de la co-conception. Nous présenterons l'approche développée à l'ONERA pour optimiser une telle caméra, reposant sur l'optimisation conjointe d'un masque de phase et un apprentissage adversaire entre deux réseaux de neurones, l'un effectuant une tâche utile et l'autre une tâche attaquant la vie privée. Nous montrons des résultats expérimentaux obtenus avec le masque de phase co-conçu.

4. Bibliographie

- [Elmalem2018] Elmalem, S., Giryès, R., and Marom, E. (2018). Learned phase coded aperture for the benefit of depth of field extension. *Opt. Express*, 26(12):15316–15331.
- [Dufraisse2024] Dufraisse, M., Carvalho, M., Trouvé-Peloux, P., and Champagnat, F. (2024). Physics based camera privacy: Lens and network co-design to the rescue. In *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) Workshops*, pages 1410–1419.
- [Volatier2024] Volatier, J.-B., Beaussier, S. J., Druart, G., Jougla, P., and Keller, F.(2024). Implementation of formidable: A generalized differential optical design library with nurbs capabilities. *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications*, 20(1):2.

Réseau français de magnétométrie

P. Rossa¹, R. Mattana², A. Solignac³

¹ ICMCB – UMR5026

² Laboratoire Albert Fert

³ SPEC CEA Saclay

aurelie.solignac@cea.fr; patrick.rosa@icmcb.cnrs.fr; richard.mattana@cnrs-thales.fr

La magnétométrie comprend l'ensemble des techniques de mesure du champ magnétique, du moment magnétique et des caractéristiques liées aux propriétés magnétiques des matériaux. Les techniques de magnétométrie sont polyvalentes et non destructives. Elles permettent de caractériser à distance une large gamme de matériaux bruts et fonctionnalisés, ainsi que des processus mettant en jeu des effets magnétiques.

Le réseau francophone de magnétométrie rassemble 33 instituts de recherche qui développent et/ou utilisent des outils de magnétométrie (du capteur magnétique aux magnétomètres intégrés). Ils travaillent principalement dans les domaines des capteurs, des sciences des matériaux, de la chimie, la physique, la métallurgie, l'électronique, les nanosciences, la médecine, la biologie et la géologie.

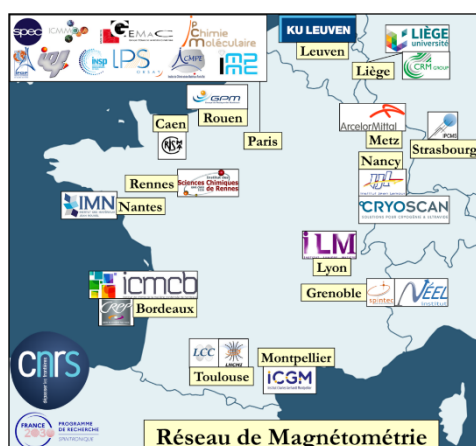
Le réseau francophone de magnétométrie, créé en 2015, rassemble une communauté de chercheurs et ingénieurs francophones dans le domaine de la magnétométrie. Il a pour objectifs principaux :

- Intensifier les échanges scientifiques et techniques entre les développeurs et utilisateurs de magnétomètres
- pérenniser et améliorer les connaissances, le savoir-faire et les bonnes pratiques
- assurer une veille technologique et coordonner de nouveaux développements techniques
- promouvoir les collaborations R&D entre institutions académiques et les entreprises privées.
- enseigner et former de jeunes scientifiques et ingénieurs
- populariser la magnétométrie dans l'ensemble de la communauté scientifique et le grand public

Ce site vous informe sur les outils de la magnétométrie et leurs utilisations, les nouveautés techniques ainsi que les diverses actions du réseau (formation, services R&D, publications, conférences, etc.).

Devenez membre du réseau pour accéder aux documents techniques partagés et aux forums de discussions. Vous pourrez poser vos questions aux meilleurs experts nationaux du domaine et y partager vos expériences.

Contactez nous pour des besoins en mesure magnétique ou des projets R&D. Les ingénieurs et chercheurs du réseau pourrons vous conseiller et vous accompagner dans vos études matériaux, vos travaux d'optimisation de procédé ou encore vos développements instrumentaux. Visitez notre catalogue de prestations et services R&D.



Référence

<https://magnetometrie.cnrs.fr/>

Imagerie de contraste speckle laser (LSCI) en temps réel pour l'assistance à la chirurgie thyroïdienne

A. Dareau¹, J. Pham¹, A. Da Silva¹, N. Bertaux¹

S. Mailfert¹, F. Galland¹, F. Benmiloud², J. Fade¹

¹ : Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Marseille, Institut Fresnel, Marseille, France

² : Hôpital Européen, Fondation Ambroise Paré, Marseille, France

arthur.dareau@fresnel.fr

Résumé

L'imagerie de contraste speckle laser (LSCI) permet la visualisation en temps réel et sans agent de contraste du flux sanguin dans les tissus biologiques. En analysant les motifs d'interférence produits par la diffusion cohérente de la lumière laser, la LSCI offre un indicateur sensible de la dynamique microvasculaire. Nous avons appliqué cette méthode à des fantômes optiques simulant la peau et une vascularisation, ainsi qu'à des images in vivo de la main humaine. Les résultats montrent une bonne corrélation entre les estimations expérimentales, simulées et théoriques de la taille de speckle, optimisée autour de 1–2 pixels. Cette approche pourra constituer à terme une alternative complémentaire sans marquage et temps réel, à l'imagerie de fluorescence pour le suivi peropératoire de la vascularisation des glandes parathyroïdes.

1. Introduction

Les glandes parathyroïdes, essentielles à la régulation du calcium, peuvent être endommagées lors de chirurgies thyroïdiennes. Une surveillance en temps réel de leur vascularisation durant l'opération est donc cruciale pour éviter des complications post-opératoires lourdes.

L'imagerie de fluorescence, qu'elle soit endogène ou exogène (ICG), présente certaines limites liées à la durée d'observation ou à l'injection d'un agent. Le contraste de speckle, offre une alternative non invasive pour la visualisation du flux sanguin.

2. Principe et descriptif expérimental

Le principe de la LSCI repose sur l'analyse du contraste speckle K , défini comme : $K = \frac{\sigma}{\mu}$

où σ et μ représentent respectivement l'écart-type et la moyenne d'intensité calculés sur une fenêtre locale de 5×5 à 7×7 pixels. Le contraste varie en fonction de temps de corrélation défini par : $\tau_c = \frac{\lambda}{2\pi v}$ où λ et v représentent respectivement la longueur d'onde du laser et la vitesse du flux observé. Ainsi, plus la vitesse du flux est grande, plus le temps de corrélation est court ce qui se représente par une chute de contraste, traduisant la dynamique des particules diffusantes.

Dispositif expérimental : Le système se compose d'un laser polarisé linéairement éclairant un échantillon diffusant, et d'une caméra rapide enregistrant les motifs de speckle. Le calcul du contraste est réalisé en temps réel sur un logiciel de traitement développé dans le cadre du projet.

Des expériences ont été menées sur des fantômes optiques comportant des circuits microfluidiques simulant l'écoulement sanguin, ainsi que in vivo sur des tissus humains (paume de la main).

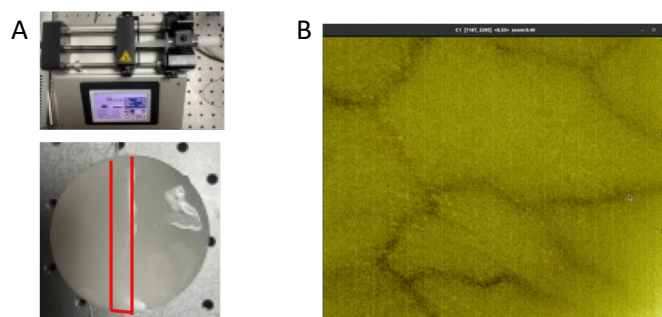


Figure 1 : A) Exemple de fantôme utilisé avec un pousse seringue. B) Exemple d'image obtenue en temps réel sur la paume d'une main (fenêtre 7x7)

1. Résultats

Les résultats de mesure ont été comparés aux prédictions théoriques, ce qui nous a permis d'obtenir la courbe présentée en figure 2.A. Celle-ci illustre l'évolution du contraste en fonction du rapport entre le temps d'exposition T_e et le temps de corrélation τ_c .

Par ailleurs, une nouvelle méthode statistique de calibration de la taille des speckles a été développée, basée sur l'évolution du rapport entre le contraste de speckle d'une image, et le contraste obtenu sur cette même image après une opération de « binning » d'un facteur $M \times M$. Cette approche permet d'estimer la taille de speckle de manière robuste, indépendamment de la distribution d'intensité sous-jacente (y compris en termes de précision d'estimation).

La figure 2.B présente une comparaison entre la formule théorique, sa simulation numérique et les données expérimentales correspondantes.

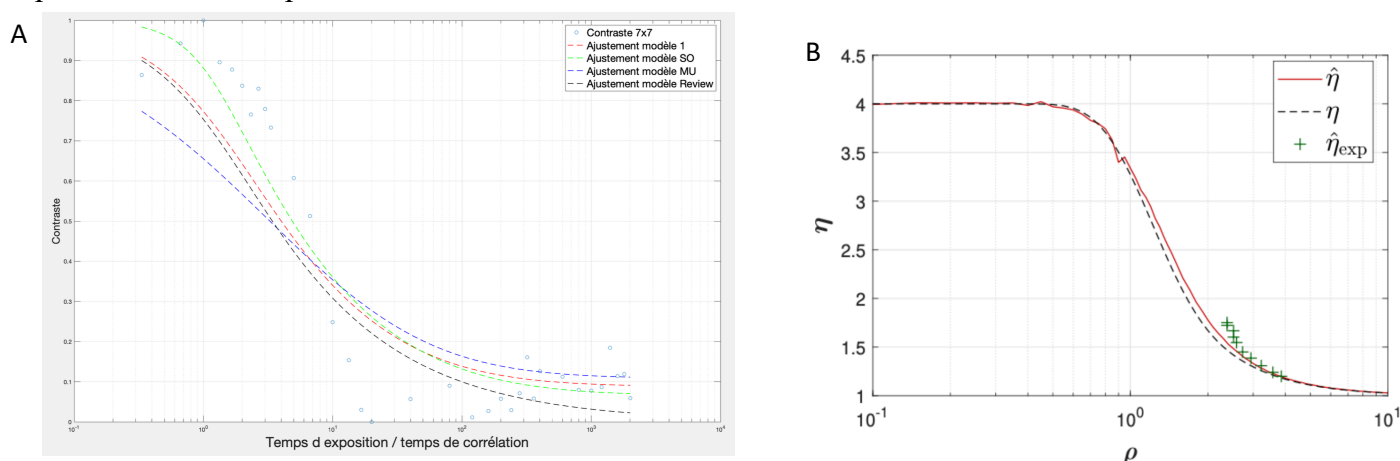


Figure 2 : A) Comparaison entre l'évolution expérimentale du contraste en fonction T_e/τ_c avec la théorie [3]. B) Comparaison entre la prédiction théorique de η , de l'estimateur simulé $\hat{\eta}$ et des mesures expérimentales $\hat{\eta}_{exp}$.

4. Conclusion

Cette étude démontre le potentiel de la LSCI comme outil d'imagerie peropératoire, capable de fournir une visualisation en temps réel de la vascularisation des glandes parathyroïdes sans recours à un agent fluorescent.

La robustesse et la rapidité de la méthode ouvrent la voie à une intégration clinique complémentaire à l'imagerie de fluorescence endogène pour la chirurgie thyroïdienne.

5. Remerciements

Ce travail a été financé par le projet Amidex Specialthy (2SPECISE) et l'Hôpital Européen.

Le stage de M2 d'Arthur Dareau a été soutenu par Institut Imaging (Amidex), et il est actuellement financé par Centrale Méditerranée.

6. Bibliographie

- [1] Sridhar S., *Elliptically polarized light for depth resolved diffuse reflectance imaging in biological tissues*, Doctoral dissertation, 2016.
- [2] Matson et al., *Mini-invasive Surg*, 2023.
- [3] Liu C. et al., *Biomedical Optics Express*, 2021.
- [4] Goodman W., *Speckle phenomena in optics: theory and application*, SPIE Press, 2007.

Simulation of Fluorescence Diffuse Optical Tomography Images for Database Creation

M. Rodriguez-Vega¹, P. Nguyen¹, J. Wojak², M. Henry², V. Josserand², A. da Silva¹

¹: Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Med, Institut Fresnel, France

²: Institute for Advanced Biosciences, University Grenoble Alpes, INSERM U1209, CNRS UMR 5309, 38000 Grenoble, France
 rodriguez-vega@fresnel.fr

Abstract

Fluorescence Diffuse Optical Tomography enables non-invasive 3D imaging of biological tissues, but the lack of standardized simulated datasets limits progress in algorithm development and benchmarking. We present a modular simulation framework and a large-scale open database supporting both NIR-I and NIR-II imaging. This resource is designed to accelerate AI-based reconstruction methods and ensure reproducible research

1. Introduction

Fluorescence Diffuse Optical Tomography (FDOT) is a non-invasive imaging method used to reconstruct the distribution of contrast agents inside biological tissues. Most research on FDOT has traditionally focused on the first Near-Infrared window (NIR-I, 700–900 nm) due to the lower absorption of water in this spectral region. However, interest in the second Near-Infrared window (NIR-II, 900–1800 nm) has grown because reduced scattering in this range can potentially improve spatial resolution [1]. It is necessary to adapt mathematical methods and data processing techniques to address the challenges specific to this new spectral region. Here, we describe the creation of a large simulated dataset that can serve as a standard benchmark for the scientific community, enabling comparison of different reconstruction methods and supporting the training of Artificial Intelligence (AI) algorithms, which have already shown promise in FDOT applications [2].

2. Methodology

The software used to generate the database will be shared as open-source code. It is designed using a modular structure with the following components: 1) Creation of the domain of interest, 2) Definition of the experimental acquisition, 3) Solution of the forward problem, 4) Measurement model, 5) Post-processing and storage. A schematic of the setup is shown in Fig. 1.

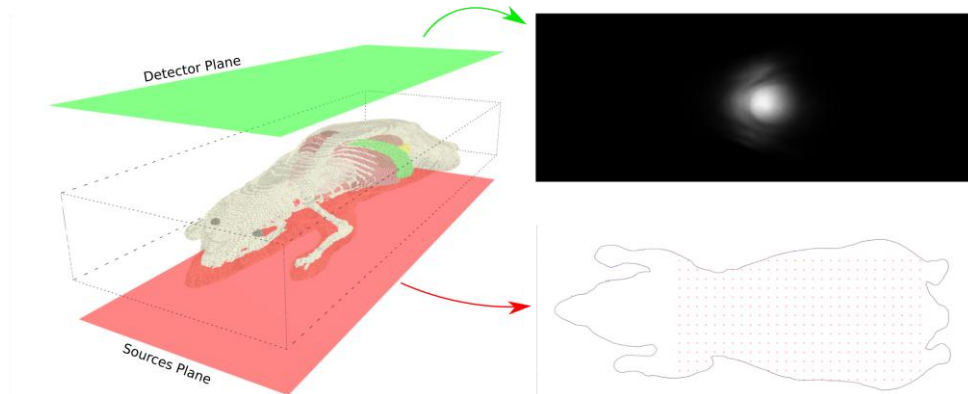


Figure 1. Simulated setup for tomographic measurements.

The domain corresponds to the sample under study, modeled as a volume composed of labeled subdomains, each representing a different tissue type. Domains are generated using randomly created shapes to increase dataset heterogeneity. Additionally, for each tissue type, a set of optical properties at both the excitation and fluorescence wavelengths must be defined. These properties are computed by modeling each tissue as a mixture of fundamental substances (water, fat, hemoglobin, bone, bile)

with known spectra and varying proportions [3].

The experimental acquisition is defined by a set of source locations within a predefined region of interest. For each source position, the forward problem involves solving a differential equation that models light propagation inside the tissue. The primary model is the Radiative Transfer Equation (RTE), solved using Monte Carlo methods [4]. For highly scattering media, the Diffusion Approximation (DA) is also employed to reduce computation time.

Once a solution is obtained, the measurement model uses the light intensity at the surface of the domain to generate simulated images, replicating the output of a real detector under equivalent conditions [5]. For each source position, two images are produced: one for the excitation signal and another for the fluorescence response.

3. Preliminary results

In the first simulation round, 75 samples were generated using 19 geometries and 6 sets of optical properties. The geometries replicated a mouse model [6] with different fluorophore locations. Each experiment included seven acquisitions: one excitation at 808 nm and six fluorescence measurements at 900, 1050, 1100, 1200, 1300, and 1400 nm. Regions of interest (ROIs) were centered at the centroid of fluorophore distributions, with at least a 1 cm margin, yielding scan areas of approximately 3×3 cm. Source positions were distributed on a uniform grid with 2 mm spacing. This configuration mimics an existing experimental setup, enabling validation of the simulations with real data.

The second round of simulations were performed using randomized geometries that varied the number, shape, and location of major organs. This set consists of 3,800 acquisitions. Although these geometries no longer correspond to real biological distributions, they help prevent AI overfitting to mouse-like anatomies and can be used to benchmark reconstruction performance on arbitrary shapes. The same experimental configuration was maintained, but currently only the fluorescence at 1050 nm has been computed.

The present database has already been used to evaluate reconstruction accuracy under realistic scenarios, and the development of an AI tool is currently underway.

4. Conclusion

We have introduced a modular framework for generating a large-scale simulated FDOT dataset, with a focus on NIR-I and NIR-II imaging. By ensuring reproducibility and accessibility, this initiative aims to support the broader research community in advancing FDOT techniques, particularly for AI-driven applications.

5. Acknowledgments

*This work was supported by the French government under the France 2030 investment plan through Initiative d'Excellence d'Aix-Marseille Université A*MIDEX (grant AMX-20-TRA-053), and by Agence Nationale de la Recherche (ANR) (grants France Life Imaging ANR-11-INBS-0006, SAMURAI2 ANR-24-CE19-2073-01).*

6. Bibliography

- [1] Wang F. et al, In vivo NIR-II fluorescence imaging for biology and medicine, *Nature photonics*, vol. **18**, 535-547, 2024.
- [2] Schimdt E. et al, Near-infrared II fluorescence imaging, *Nature Reviews Methods Primers*, vol. **4**, 23, 2024.
- [3] Jacques S. L., Optical properties of biological tissues: A review, *Phys. Med. Bio.*, vol. **58**, 11, 2013.
- [4] Fang Q. and Boas D., Monte Carlo Simulation of Photon Migration in 3D Turbid Media Accelerated by Graphics Processing Units, *Optics Express*, vol. **17**, 22, 2009.
- [5] Arridge S., Optical tomography in medical imaging, *Inverse Problems*, vol. **15**, 2, 1999.
- [6] Dogdas B. et al, Digimouse: a 3D whole body mouse atlas from CT and cryosection data, *Phys. Med. Bio.*, vol. **52**, 577-587, 2007.

Towards Dynamic 3D Elastography of Oocytes

J. PACHECO¹, V. BAROLLE², P. BALONDRADE², F. LEMOULT¹, A. AUBRY¹

¹Institut Langevin, ESPCI Paris, PSL University, 1 rue Jussieu, 75005 Paris, France

²OWLO, ESPCI Paris, PSL University, 1 rue Jussieu, 75005 Paris, France

alexandre.aubry@espci.fr

Abstract

Optical Coherence Elastography (OCE) leverages the high-resolution power of optical imaging to construct mechanical contrast maps (elastograms) of biological samples. Holography [1] is an imaging modality which provides fast 3D reconstruction as it combines Optical Coherence Tomography (OCT) with wide-field illumination to reconstruct en-face images at different depths. In our work, we leverage Holography acquisitions for an OCE characterization of oocytes as a way to potentially guide the biophysics study of this type of cell.

Optical acquisitions were taken in a Full-Field Swept-Source OCT (FF-SS-OCT) system [2] providing an axial resolution of 4 μm . A speaker was the source of harmonic acoustic waves that induced axial displacement in oocytes. This displacement was encoded into the optical acquisitions and decoded with a compensation of a reference (static) measurement. The 3D time evolution of displacement fields inside oocytes was observed with the Holography method. A linear and well-defined acoustic response was obtained after Singular Value Decomposition (SVD) analysis and demodulation of the initial displacement field.

We are aiming to improve the results obtained so far with the introduction of the Matrix Imaging approach [3] in which different wide-field illumination angles in the FF-SS-OCT system will be coherently recombined to counter multiple scattering arising from the sample. Furthermore, we are planning to expand our experiments in the multifrequency domain of acoustic excitations to take advantage of noise correlation approaches [4] and robust estimation of the acoustic signal that will ultimately serve as a pivot for 3D elastogram displays.

References

- [1] Hillmann, D. Holography. (Springer Vieweg, 2015)
- [2] Balondrade, P., Barolle, V., Guigui, N. et al. Nat. Photon. 18, 1097–1104 (2024)
- [3] Barolle, Victor, et al. "Optical matrix imaging applied to embryology." arXiv preprint arXiv:2410.11126 (2024)
- [4] Marmin A, Catheline S, Nahas A. Full-field passive elastography using digital holography. Opt Lett. 2020

Affiche GT4

Conception et mesure de coupleurs hybrides à base de twists en technologie GaN pour des applications 5G

S. Vigneswaran¹, E. Kerhervé¹, N. Deltimple¹, R. Mathieu², K. Vivien²

¹ : Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, IMS, UMR 5218, F-33400 Talence, France

² : United Monolithic Semiconductors, Villebon-sur-Yvette, France
 sujeevan.vigneswaran@u-bordeaux.fr

Résumé

Cette contribution présente les résultats des premiers coupleurs twistés réalisés en technologie GaN (GH15 UMS) pour des applications 5G. Tout en restant compacts, ces différents coupleurs se distinguent en optimisant les pertes d'insertion, la bande passante ainsi que le facteur de forme, faisant de ces structures une parfaite alternative aux coupleurs de Lange et Branchline.

1. Introduction

Afin de répondre aux exigences du standard 5G, les contraintes en bande passante et en débit binaire ont complexifié la conception des émetteurs RF. Avec l'introduction de nouvelles techniques telles que le beamforming, les amplificateurs de puissance doivent désormais être en mesure de gérer les variations d'impédance de l'antenne dues à l'orientation du faisceau. Pour répondre à ce problème, les coupleurs hybrides sont utilisés dans les architectures d'amplificateurs équilibrés afin d'apporter une immunité à ces variations. Dans le but de réduire la taille des amplificateurs, tout en s'affranchissant du caractère bande étroite des coupleurs à ligne quart d'onde, les coupleurs twistés ont été étudiés en technologie GaN.

2. Description des différentes structures de coupleurs twistés

Initialement conçu en technologie silicium [1], le coupleur twisté résulte de la combinaison de lignes couplées (principalement inductives) avec un twist au centre de la structure, apportant une contribution capacitive (Fig.1a). À partir d'une fréquence centrale (f_0), d'une impédance caractéristique (Z_0) et d'un coefficient de couplage (k), les contributions du coupleur sont estimées à l'aide de l'équation (1).

$$L = \frac{(2 - k)Z_0}{\omega_0} \quad C = \frac{(2 - k)}{2Z_0\omega_0} \quad (1)$$

Connaissant ces contributions, le coupleur twisté est implémenté en technologie GaN [2] en apportant des modifications structurelles afin d'obtenir une structure mécaniquement stable. Le twist est obtenu en utilisant deux couches métalliques en regard, M1 (destinée aux interconnexions) et PO (généralement employée pour réaliser des ponts au-dessus de M1), séparées par un isolant afin de former une capacité MIM (Fig.1b). Le pont aérien est maintenu de part et d'autre de la structure à l'aide de piliers (ouverture remplies d'or), afin d'éviter son effondrement tout en réalisant la connexion électrique avec les lignes couplées.

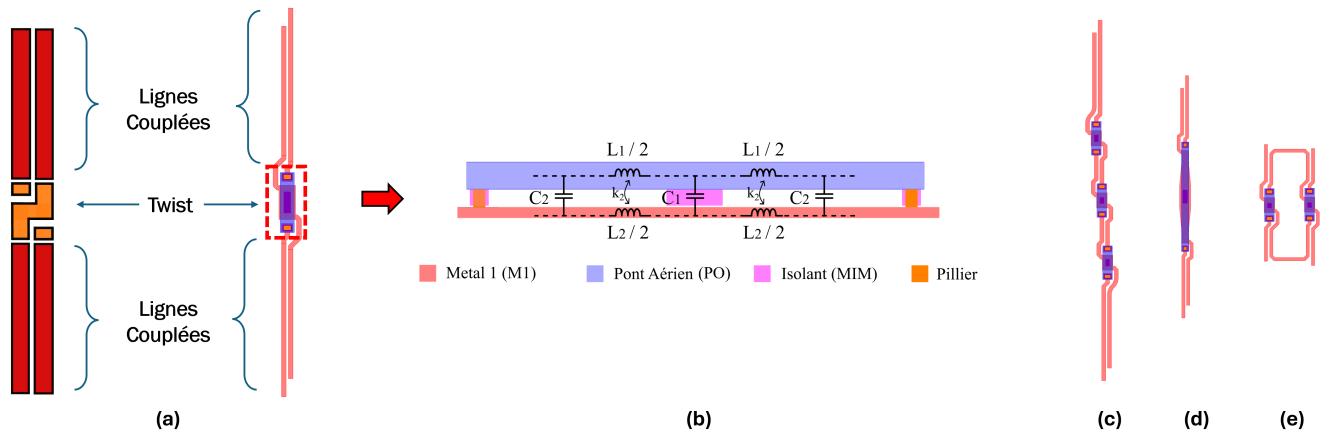


Figure 1 : Coupleurs twistés en technologie GaN : (a) Layout du coupleur twisté, (b) Vue en coupe du twist, (c) Coupleur hybride à 3 twists, (d) Coupleur twisté allongé, (e) Coupleur twisté à 2 branches.

À partir de la structure élémentaire du twist, un premier coupleur formé de 3 twists (Fig.1c) est développé afin d'augmenter la bande passante à 1dB du coupleur. Pour ce faire, les contributions capacitives des twists sont modifiées de manière à obtenir différentes fréquences de résonance. Afin de conserver l'ordre des ports du coupleur, un nombre impair de twist dans la structure est nécessaire.

Dans l'optique d'améliorer les performances du coupleur twisté, une seconde version (Fig.1d), basée sur un twist allongé, a été réalisée afin de réduire les pertes d'insertion. En effet, le couplage inductif est plus important sur des lignes superposées ($k = 0.88$) par rapport à des lignes planaires ($k = 0.59$). Cette modification permet de diminuer les pertes résistives de la structure tout en réduisant la taille du coupleur hybride.

La troisième structure (Fig.1e) réalisée à partir de twists sur deux branches en parallèle, permet d'agir sur le facteur de forme du coupleur afin d'adapter son empreinte en fonction de l'emplacement disponible sur le circuit. Les contributions inductives et capacitives sont réparties équitablement entre les deux branches, ce qui permet de réduire la hauteur du coupleur.

3. Résultats de mesure

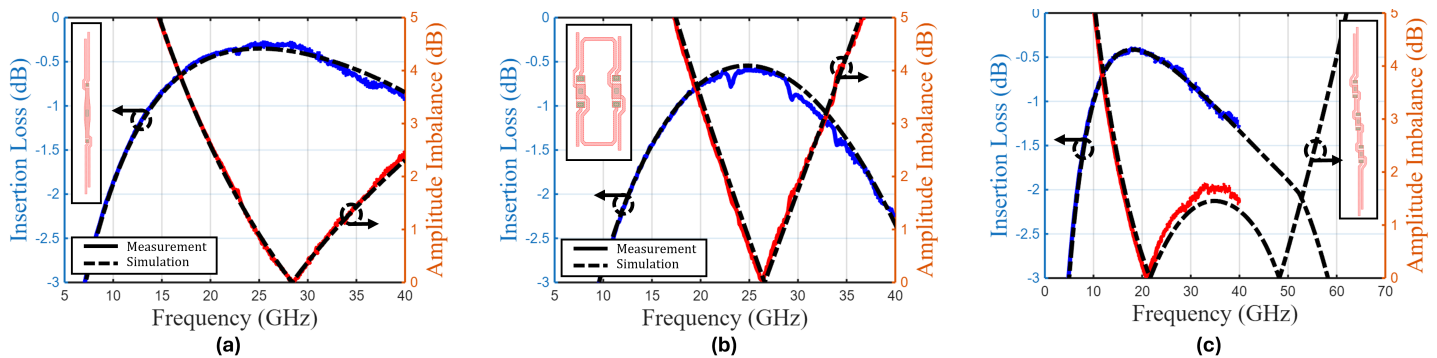


Figure 2 : Mesures des coupleurs : (a) Coupleur twisté allongé, (b) Coupleur twisté à 2 branches, (c) Coupleur hybride à 3 twists.

Des mesures de paramètres S sous pointes sont réalisées afin d'évaluer les performances des coupleurs hybrides. Le coupleur twisté allongé (Fig.2a) présente des pertes d'insertion de l'ordre de 0.28 dB, avec une bande passante à 1dB de 30%. Le coupleur twisté à deux branches (Fig.2b) présente des pertes d'insertion de l'ordre de 0.55 dB avec une bande passante de 16%. En revanche, son intérêt réside dans sa capacité à modifier son facteur de forme. Le coupleur hybride à trois twists (Fig.2c) permet d'élargir la bande passante du coupleur grâce à un bon dimensionnement des valeurs de capacité des twists. Une bande passante de l'ordre de 80% peut-être atteinte avec cette structure, rendant celle-ci particulièrement intéressante pour les applications large bande.

4. Conclusion

Dans cette contribution, l'implémentation du coupleur twisté en technologie GaN permet de démontrer son intérêt en termes de compacité, tout en présentant des performances en bande passante et en pertes d'insertion similaires à celle observées dans l'état de l'art. Le coupleur twisté devient ainsi une alternative aux coupleurs conventionnels afin de réduire la taille des circuits.

5. Remerciements

Les auteurs remercient UMS pour la fabrication ainsi que la mesure des circuits. Ce travail a bénéficié d'une aide de l'Etat gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre de France 2030 portant la référence ANR-22-PEFT-0005 (NF-YACARI)

6. Bibliographie

- [1] V. Knopik, B. Moret, and E. Kerherve, "Integrated scalable and tunable RF CMOS SOI quadrature hybrid coupler," in 2017 12th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC), 2017.
- [2] S. Vigneswaran, E. Kerhervé, N. Deltimple, R. Mathieu and K. Vivien, "Twisted-Shaped Millimeter-Wave Hybrid Couplers in 150 nm GaN Technology for 5G Applications," 2025 IEEE/MTT-S - IMS 2025, San Francisco, CA, USA, 2025

Morphogenetic Metasurface Antennas

C. N. Uche¹, C. Decroze¹, N. Parsaei², T. Fromentèze¹

¹: University of Limoges, CNRS, XLIM, UMR 7252, F-87000 Limoges, France

²: Centre d'Ingénierie des Systèmes en Télécommunications en Electromagnétisme et Electronique (CISTEME) F-87000 Limoges, France
Chidinma_nnekwu.uche@unilim.fr

Abstract

We present a recent approach to designing self-organized metasurface antennas with high gain and bandwidth, making them suitable for a wide range of applications. Metasurfaces have become a focal point in antenna design due to their unique electromagnetic behavior. In our work, we employed a morphogenetic synthesis approach, inspired by Alan Turing's research on the emergence of complex structures in biological systems, to automate the synthesis and self-structuring of meta-atoms. We adapt his conceived reaction-diffusion principle to control anisotropic tensors for the synthesis of metasurface antennas, enabling the self-organization of sub-wavelength elements without gradient descent optimization, and achieving desired electromagnetic characteristics on a macroscopic scale. The simplicity of this approach, combined with the introduction of partial disorder into the meta-atom arrangement, enhances the design process and homogenization efficiency.

1. Introduction

Metasurfaces are powerful tools for electromagnetic wave manipulation and have properties such as, low profile, embedded feeding structures, and surface-boundary electromagnetic interactions. They are designed by arranging subwavelength elements on a grounded slab, and the feeding structure typically comprises a surface wave launcher located at the center of the antenna, which couples the input mode to a transverse magnetic surface wave. In this work, we employed a morphogenetic synthesis approach first deployed in [1] to design metasurface antennas. This approach facilitates the self-organization of sub-wavelength elements without gradient descent optimization, to synthesize the physical parameters expected on a local scale, so that electromagnetic radiation constraints can be obtained on a macroscopic scale, analogous to the emergence of the complex characteristics of living organisms [2]. One notable advantage of this synthesis method is the simplicity of design and the efficiency of homogenization in generating meta-atoms and their self-organizing patterns by introducing partial disorder into the structures [3].

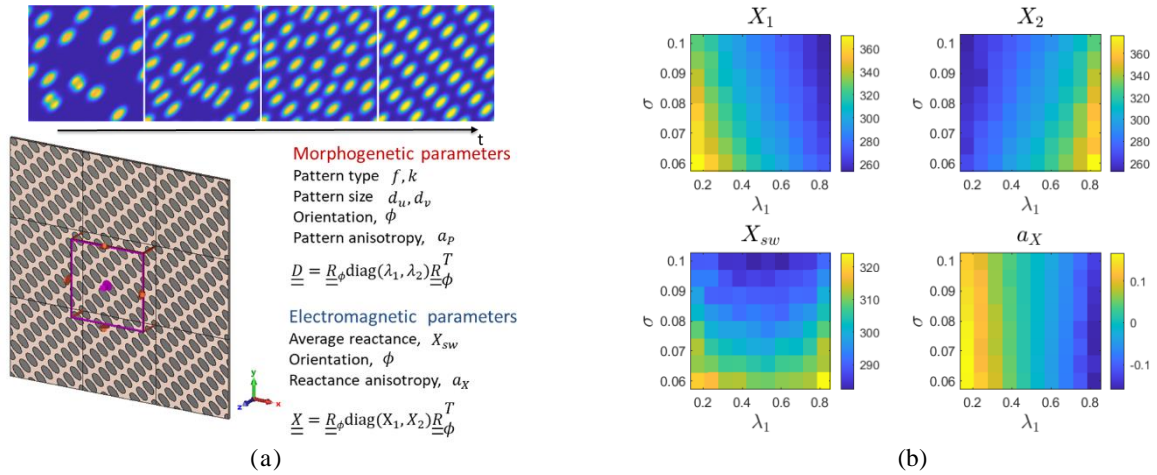


Figure 1. Characterization of Anisotropic Patterns: (a) defining morphogenetic parameters for pattern generation, FEM analysis, and (b) extraction of electromagnetic properties.

2. Morphogenetic Generation

The morphogenetic growth of meta-atoms is modeled by iteratively solving Eq. (1) with finite differences, where the interaction of species U and V produces spatial patterns through a purely local mechanism (Fig. 1a). The desired electromagnetic properties are translated into morphogenetic parameters, which drive the self-organization of

subwavelength elements. The resulting patterns evolve by successive splitting until the full domain is occupied and are then characterized in the frequency domain using a Floquet port at normal incidence. As shown in Fig. 1b, this characterization yields the eigenvalues of the reactance tensor, average reactance, and modulation, with λ_1 controlling anisotropy and σ adjusting pattern spacing.

$$\frac{\partial U}{\partial t} = d_u \nabla \cdot (\underline{\underline{D}} \nabla U) - UV^2 + f(1 - U), \quad \frac{\partial V}{\partial t} = d_v \nabla \cdot (\underline{\underline{D}} \nabla V) + UV^2 - (f + k)V. \quad (1)$$

3. Results

The metasurface antenna in Fig. 2a was designed using parameters obtained from the characterization stage at 20 GHz and implemented on a substrate with permittivity $\epsilon_r = 3.6$ and thickness 1.52 mm. The radiating aperture measures 150×150 mm, which corresponds to $10\lambda_0 \times 10\lambda_0$ at the operation frequency. The antenna radiates a left-hand circularly polarized beam. The full-wave analysis of the metasurface antenna, displayed in Fig. 2b, yields a maximum directivity of 24.30 dB and a realized gain of 23.91 dB. As illustrated in Fig. 2c, the axial ratio remains below 3 dB across the 18 to 22 GHz band. At the operating frequency of 20 GHz, the half-power beamwidth gives 1.8 GHz, resulting in the relative bandwidth of 9 %. The cross-polarization is less than 5 dB for a maximum co-polarization of 24.3 dB.

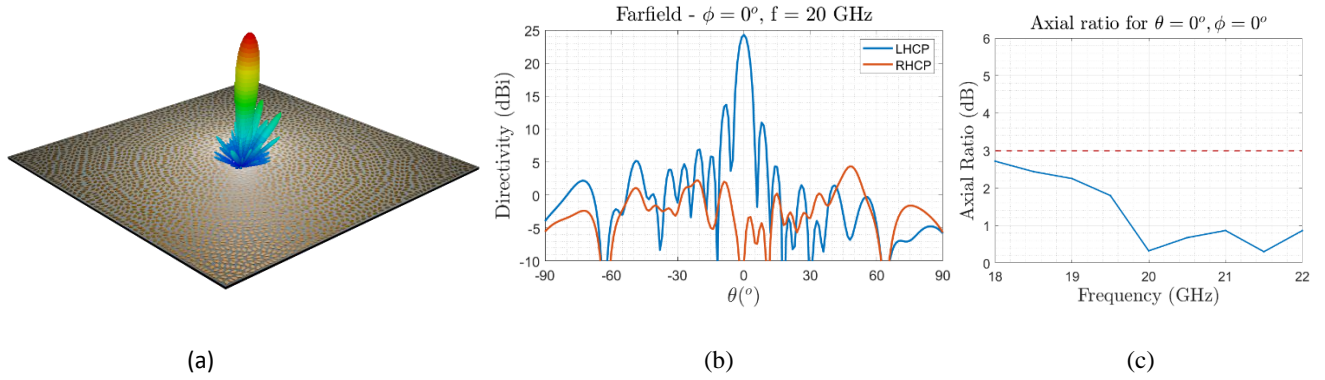


Figure 2. (a) Morphogenetic metasurface antenna designed at 20 GHz (b) far-field radiation pattern showing a left-hand circularly polarized (LHCP) beam at the operating frequency, and (c) axial ratio of the antenna across the operating band.

4. Conclusion

The results obtained underscore the effectiveness of the morphogenetic approach, which enables the automatic generation and synthesis of anisotropic patterns, leading to enhanced homogeneity of the patterns compared to conventional metasurface antennas that rely on Cartesian grids.

5. Acknowledgement

This work is supported by the French National Research Agency (ANR JCJC MetaMorph ANR-21-CE42-0005 and LABEX Σ -LIM ANR-10-LABX-0074-01), the Research and Technology Center Cisteme, the Région Nouvelle-Aquitaine (GPMR research project), and has received financial support from the CNRS through the MITI interdisciplinary programs via its Exploratory Research program.

6. Bibliography

- [1] T. Fromentèze, O. Yurduseven, C. Uche, E. Arnaud, D. R. Smith, and C. Decroze, "Morphogenetic metasurfaces: Unlocking the potential of turing patterns," *Nature Communications*, vol. 14, no. 1, p. 6249, 2023.
- [2] Uche, C. N., Decroze, C., Parsaei, N., & Fromentèze, T. (2024, September). Investigating Striking Efficiency in Morphogenetic Metasurface Antennas with Low Modulation. In 2024 54th European Microwave Conference (EuMC) (pp. 612-615). IEEE.
- [3] C. N. Uche, N. Parsaei, C. Decroze and T. Fromentèze (2025), "Breaking Periodicity with Morphogenetic Metasurfaces," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, doi: 10.1109/TAP.2025.3609217.

Antennes boucles magnétiques à 1 GHz pour lentilles de contact intelligentes

P. Salzenstein¹, A. M. Bessou¹, B. Guichardaz¹

¹ FEMTO-ST UMR 6174, Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Université Marie et Louis Pasteur (UMLP), 15B avenue des Montboucons, F25030 Besançon Cedex, FRANCE
 patrice.salzenstein@femto-st.fr

Résumé

Ce travail étudie la conception électromagnétique, les performances et les aspects thermiques d'antennes à double boucle micro-fabriquées destinées à des lentilles de contact intelligentes auto-alimentées. Une structure compacte à double boucle empilée, avec des boucles de 9,5 mm de diamètre, est optimisée pour la bande 900 MHz–1,1 GHz, résonnant autour de 1,01 GHz. L'antenne génère un diagramme de rayonnement large avec des directions verticales privilégiées, permettant une communication sans fil avec des appareils tels que les smartphones et les montres connectées. Son facteur de qualité (Q) d'environ 5 assure un fonctionnement à large bande tout en respectant les contraintes strictes de taille imposées par la lentille. Les analyses électriques et thermiques mettent en évidence des pertes résistives dues à l'effet de peau dans les conducteurs en or, avec une profondeur de peau d'environ 0,7 μm conduisant à une faible efficacité de rayonnement (0,02–0,71 %). Le couplage entre la grande et la petite boucle ($k \approx 0,59$) favorise la détection en champ proche et le transfert d'énergie sans fil. Malgré les limitations en matière de rayonnement, ces antennes présentent un fort potentiel pour assurer une communication fiable à courte portée dans des lentilles de contact intelligentes autonomes et biocompatibles.

1. Introduction

Suite à des travaux antérieurs [1, 2] sur la conception de lentilles de contact [3], dont l'énergie peut être fournie par la salinité des larmes [4] ou le clignement des yeux [5], ce travail se concentre sur la conception électromagnétique, et l'analyse des performances d'antennes à double boucle magnétiques, spécifiquement développées pour des lentilles de contact intelligentes auto-alimentées. La structure compacte d'antenne à double boucle est constituée d'une grande boucle d'un diamètre de 9,5 mm et d'une petite boucle de dimension inférieure, optimisées pour une radiation directionnelle dans la gamme 900 MHz - 1,1 GHz, centrée sur 1,01 GHz, adaptées à la communication sans fil avec des dispositifs externes tels que les smartphones et les montres connectées. Toutefois il y a une faible efficacité de rayonnement (0,02 à 0,71 %). Le couplage inductif entre les antennes est modéré ($k \approx 0,59$), mais adapté au capteur en champ proche et au transfert d'énergie. L'intégration de ces antennes dans des lentilles de contact montre leur potentiel pour une communication fiable à courte portée, malgré les limitations inhérentes au rayonnement, marquant une avancée significative dans le développement de dispositifs biomédicaux portables autonomes et biocompatibles.

2. Bande de fréquence d'utilisation et paramètres principaux des antennes boucles magnétiques



Figure 1. (a) Principe de fabrication d'une lentille de contact, avec antenne, circuit intégré spécifique (ASIC) et capteurs pour communiquer avec une montre connectée ou un mobile. (b) Cliché Freepik illustrant l'échelle et la fragilité d'une lentille de contact standard. (c) Communication entre une lentille de contact intelligente et une montre connectée et/ou un smartphone.

Table 1. Fréquences et orientation¹.

Paramètre	Détermination	Valeur – Bande passante
Fréquence opérationnelle ¹	Tx/Rx	900 MHz – 1.1 GHz
Fréquence centrale	$f = c / \lambda$	1.01 GHz
Angles préférentiels		0° – 180°

¹ Longueur d'onde estimée : $\lambda \approx 10C$ avec l'approximation d'une petite boucle. La bande passante est donnée à -3dB.

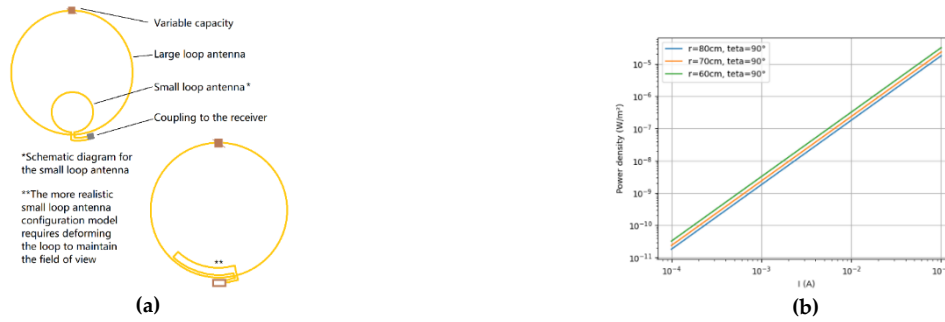


Figure 2. (a) Couplage à l'antenne émettrice-réceptrice, avec la nécessité de maintenir le champ de vision à travers la lentille. Les boucles dorées des antennes sont représentées en jaune or. Le rectangle marron en bas à droite est l'ASIC. (b) Densité de puissance reçue à 80, 70 et 60 cm.

Table 2. Résultats.

Parameter	Designation	Value (Range)
Auto-inductance de la grande antenne boucle	L_1	5.96nH
Auto-inductance de la petite antenne boucle	L_2	4.68nH
Facteur géométrique	γ	0.4
Inductance mutuelle	M	0.42nH
Coefficient de couplage	k	0.59
Effet de peau	δ	0.7 μ m
Résistance du rayonnement	R_r	0.127 m Ω
Efficacité du rayonnement	η	0.020 – 0.71%

L'antenne double boucle intégrée à la lentille de contact fonctionnant vers 1 GHz et rayonnant selon l'axe vertical, cela permet une transmission vers une montre connectée située au maximum à environ 80 cm dans le même plan. Si l'ASIC applique 0 dBm (1 mW) à l'antenne, seuls 200 nW à 7 μ W environ sont réellement rayonnés. L'affaiblissement en espace libre à 1 GHz sur 0,8 m est d'environ 30 dB. Des papiers de références sont donnés ici [6-10]. Parmi les problèmes potentiels : une forte dépendance à l'orientation de l'antenne, l'absorption [11] et les pertes dues à l'hydrogel de la lentille.

3. Conclusion

Le dispositif à base d'antenne reste à être optimisé. L'utilisation de polymères biocompatibles (PDMS) et de techniques avancées comme l'impression 3D ou la micro fabrication est essentielle pour intégrer antennes, capteurs et ASICs dans une lentille de 10 mm, tout en maîtrisant les effets thermiques, mécaniques et électromagnétiques. L'association de sources bioénergétiques, systèmes RF miniaturisés et matériaux optiques adaptatifs laisse entrevoir des applications en suivi de santé, amélioration de la vision et interaction en temps réel.

4. Bibliographie

- [1] M.V. Pogurmirsiy, et al, Proc. of SPIE 13524, 135240D (2025). <https://doi.org/10.1117/12.3058758>.
- [2] P. Salzenstein, et al, arXiv 2025, arXiv:2505.15593. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2505.15593>.
- [3] Vorobev A.Y., Vorobyev K.A., Cifra. Biomedical Sciences 3(3), 1–10 (2024). <https://doi.org/10.60797/BMED.2024.3.3>.
- [4] Jeonghun Yun et al, Nano Energy 110(1), 108344 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2023.108344>.
- [5] Pourshaban E., et al., Small 2024, 20(32), 2401068. <https://doi.org/10.1002/sml.202401068>.
- [6] Lule E., Babi T., Siwiak K., Microw. Opt. Technol. Lett. 46, 512–514 (2005). <https://doi.org/10.1002/mop.21040>.
- [7] Shastri S.P., et al, Eng. Technol. Appl. Sci. Res. 8, 3496–3501 (2018). <https://doi.org/10.48084/etasr.2308>.
- [8] Q. Balzano and K. Siwiak, IEEE Trans. Veh. Technol. 36, 173–183 (1987), <https://doi.org/10.1109/TVT.1987.2411668>.
- [9] Q. Balzano and K. Siwiak, Proc. 36th IEEE Veh. Technol. Conf., Dallas, TX, USA, pp. 15–25 (1986), <https://doi.org/10.1109/VTC.1986.1623405>.
- [10] Pfeiffer C., IEEE Transactions on Antennas and Propagation 65(4), 1642-1650 (2017). <https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2670532>.
- [11] Atanasova G., Atanasov N., Sensors 20(18), 5157 (2020). <https://doi.org/10.3390/s20174937>.

Réglage automatique électrique d'un filtre planaire à l'aide de matrices de couplages

D. Watt¹, A. Périgaud¹, N. Delhote¹, S. Verdeyme¹

¹ : Xlim UMR 7252 CNRS/Université de Limoges, 123 Avenue Albert Thomas, 87060 Limoges, France,
Dieynaba-mamadou.watt@xlim.fr

Résumé

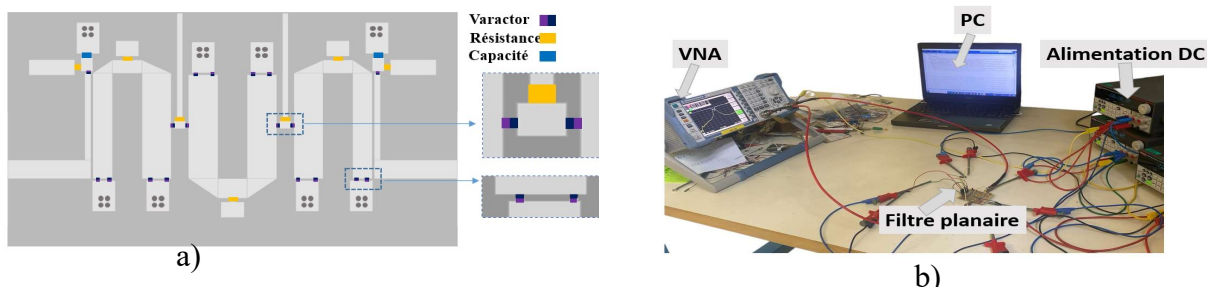
Cet article présente une méthode de réglage automatique des filtres planaires à varactors en post-fabrication. Elle repose sur l'extraction des matrices de couplage à partir des paramètres S du filtre mesuré ou simulé. Cette approche générique permet de construire un modèle équivalent puis de l'optimiser afin d'en déterminer les paramètres de réglage du filtre. Cette méthode a été appliquée expérimentalement sur un filtre planaire 3 pôles accordable en bande passante et en fréquence centrale.

1. Introduction

Dans les communications modernes, la qualité du service, qu'il s'agisse de réseaux mobiles ou de liaisons satellitaires, est déterminée par la fiabilité et la flexibilité des équipements RF. Les filtres en particulier jouent un rôle fondamental : ils assurent la sélectivité spectrale, isolent les bandes utiles et réduisent les signaux parasites. Pourtant à cause des imperfections de fabrication, les filtres présentent souvent des écarts par rapport aux spécifications, nécessitant un réglage post fabrication. Traditionnellement, ce réglage s'effectuait manuellement, ce qui est chronophage, coûteux et repose sur les compétences humaines. Pour répondre à ces limites, l'automatisation du réglage des filtres s'impose comme une solution prometteuse qu'il s'agisse du pilotage motorisé de vis ou du réglage électrique des filtres accordables. Dans ce travail, nous nous intéressons à un réglage électrique automatique d'un filtre hairpin 3 pôles accordable en bande passante et en fréquence centrale. L'approche présentée dans ce travail est basée sur l'extraction des matrices de couplage à partir des paramètres S du filtre afin de construire un modèle équivalent optimisé. Cette méthode de réglage, générique et indépendante, permet d'identifier exactement les écarts entre le comportement réel et celui idéal du filtre et d'améliorer automatiquement les performances.

2. Procédure de réglage automatique

Le processus de réglage proposé suit plusieurs étapes. Après fabrication, une mesure initiale est réalisée. Des paramètres S issus de cette mesure, la matrice de couplage correspondante est extraite à l'aide du logiciel presto ; idem, ensuite, pour les mesures issues des variations des paramètres de réglage. Ces matrices servent à construire un modèle équivalent qui va être optimisé à l'aide d'un logiciel circuit ou d'un algorithme sous Matlab. Une fois les réglages optimaux déterminés et appliqués au filtre physique, une nouvelle réponse valide le réglage, ou relance une nouvelle itération en utilisant cette réponse optimisée comme condition initiale. Cette méthode générique et indépendante de la technologie du filtre, peut être appliquée à un lot de filtres de même topologie sans répéter la phase d'apprentissage [2]. Nous avons appliqué cette méthode sur un filtre planaire similaire à celui étudié dans la référence [3]. Le banc de mesure utilisé pour le réglage automatique est constitué d'un analyseur de réseau vectoriel pour mesurer les paramètres S du filtre, de plusieurs alimentations DC pour alimenter les varactors, d'un PC exécutant l'algorithme Matlab pour piloter les alimentations et d'un filtre planaire 3 pôles. La figure 1 illustre le modèle électromagnétique (EM) du filtre hairpin et le banc automatique de réglage de ce dernier.



3. Résultats expérimentaux

Après validation de la méthode en simulation, avec une fréquence centrale réglable de [1.98 – 2.75] GHz et une bande passante ajustable de [130 – 176] MHz pour une adaptation de -20 dB, un prototype a été

fabriqué sur substrat Rogers 5880. L'accord en fréquence et couplages est réalisé à l'aide de diodes varactors MAVR-000120-1411.

La Figure 2 illustre l'évolution de la réponse du filtre depuis l'état initial jusqu'à l'optimisation. La mesure initiale donnait une fréquence centrale de 2.65 GHz, une bande passante de 198 MHz et une adaptation limitée à -8 dB. Après une première itération, nous avons obtenu une fréquence centrale de 2.69 GHz (+40 MHz), une bande passante élargie à 200 MHz (+2 MHz) et une amélioration de l'adaptation à environ -15 dB (amélioration de 7 dB).

La Figure 3 montre d'autres cas de réglage effectués sur des modèles différents, permettant d'atteindre une plage de fréquence centrale comprise entre $[2.56 - 2.69]$ GHz et une bande passante réglable entre $[148 - 200]$ MHz. Néanmoins, l'adaptation n'a pas pu être améliorée jusqu'à -20 dB et les pertes d'insertion sont restées plus élevées que prévu. Ces limitations proviennent de problèmes de report de varactors au niveau de l'un des accès, empêchant le réglage simultané de toutes les diodes. Cela a impacté les performances expérimentales par rapport aux prédictions.

Etat initial : Matlab et mesure

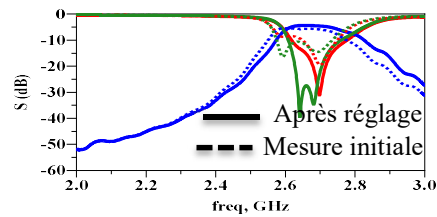
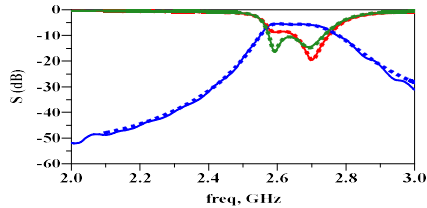


Figure 2. Évolution du réglage automatique du filtre.

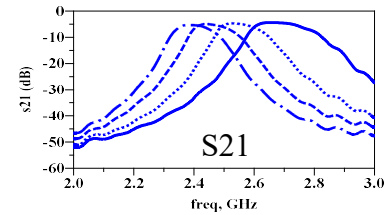
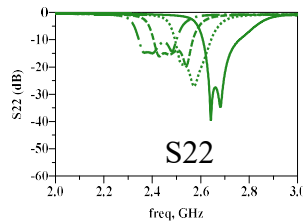
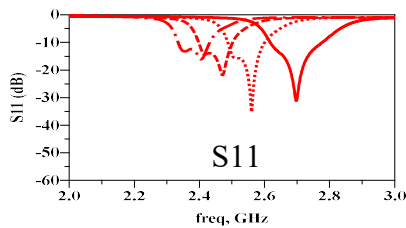


Figure 3. Cas de réglage à partir d'états initiaux différents.

4. Conclusion

Dans cette contribution, nous avons présenté une méthode de réglage automatique de filtres basée sur l'optimisation d'un modèle équivalent obtenu par l'extraction des matrices de couplages. Appliquée à un filtre planaire hairpin, elle a permis d'améliorer la fréquence centrale, la bande passante grâce à l'optimisation sous Matlab des tensions des varactors. Les essais menés sur d'autres topologies confirment la généralité et la robustesse de la méthode, ouvrant la voie à son intégration dans des chaînes RF complètes.

5. Remerciements

Les auteurs remercient la Région Nouvelle Aquitaine pour le soutien financier de la thèse.

6. Bibliographie

- [1] F. Seyfert & S. Bila, « General synthesis techniques for coupled resonator networks », IEEE Microw. Mag., vol. 8, no 5, p. 98-104, oct. 2007
- [2] O. Ourya, « Développement de procédures de réglage génériques et automatisées pour modules hyperfréquences intégrant des filtres », M.S. thesis, Dept. Electron., Université de Limoges, France, 2022
- [3] O. C. Schuster, L. Schynol, E. Polat, E. Schwab, S. Schmidt, and R. Jakoby, « Reconfigurable Hairpin Filter with Tunable Center Frequency, Bandwidth, and Transmission Zero », in *2019 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP)*, Bochum, Germany, July 16–18, 2019, DOI: 10.1109/IMWS-AMP.2019.8880068

Huygens' Metasurface for Sub-7 GHz MIMO Antenna Beamsteering

G.Medrar, A. C. Lepage, X.Begaud

LTCI, Télécom Paris, Institut Polytechnique de Paris

giles.medrar@telecom-paris.fr

Abstract

This work presents a compact architecture of a 4-element Sub-7 GHz MIMO antenna with a controllable Huygens' metasurface superstrate, enabling beam steering at 5.89 GHz and highlighting Huygens' metasurfaces capability for efficient transmission beamsteering.

1. Introduction

PERSEUS project (Power-Efficient Radio Interface for Sub-7 GHz Distributed Massive MIMO Infrastructures) [1] focuses on enabling energy-efficient, cell-free massive MIMO systems. These networks, characterized by the absence of traditional cell boundaries, offer improved coverage and reduced interference. A key enabler of such systems is beamsteering, compact, and multi-element access point antennas.

2. Antenna architecture

To achieve these objectives, we propose an access point antenna composed of four radiating elements. Each element illuminates a set of unit cells of a planar metasurface integrated as a superstrate above the radiating elements (Figure 1 (a)). The metasurface incorporates tunable components to enable beam steering over a 100° scanning range at 5.89 GHz with an 80 MHz bandwidth.

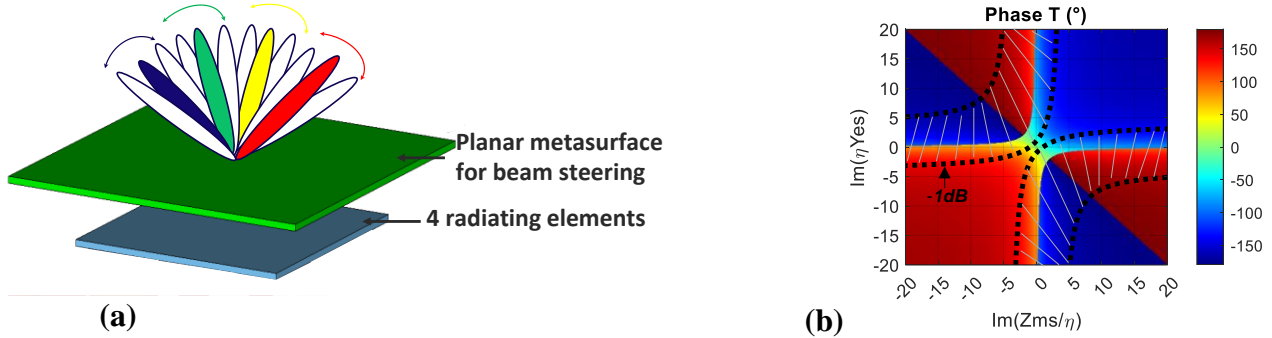


Figure 1 : (a) Antenna architecture for beamsteering, (b) Transmission phase as functions of $\text{Im}(\eta Y_{es})$ and $\text{Im}(Z_{ms}/\eta)$ (The hatched areas indicate a magnitude below -1 dB).

3. Huygens' metasurface for beamsteering

To achieve beam steering, we will use the generalized Snell's law of refraction [2].

The resulting deflection of an incident plane wave illuminating a metasurface is $\phi_\tau = \arcsin\left(\frac{\lambda}{2\pi} \frac{\Delta\Phi}{p_x}\right)$ [3], where $\Delta\Phi$ denotes the transmission phase shift between adjacent rows of unit cells, λ is the free-space wavelength, and p_x is the spacing between the centers of adjacent unit cells.

Huygens' metasurfaces represent excellent candidates for beamsteering applications, as they can provide a wide transmission phase excursion while maintaining high transmission magnitude. They support both electric and magnetic currents, and therefore they can have simultaneous non zero electric surface admittance Y_{es} and magnetic surface impedance Z_{ms} .

For a normally incident plane wave illuminating the metasurface, the transmission coefficient T can be expressed as a function of Y_{es} and Z_{ms} [4], $T = \frac{2}{2+\eta Y_{es}} - \frac{Z_{ms}}{Z_{ms}+2\eta}$, η is the impedance of free space.

When both currents are excited, perfect impedance matching between the incident and the transmitted wave become possible. As a result, full phase coverage can be achieved provided that the following condition is satisfied: $\eta^2 \text{Im}(Y_{es}) = \text{Im}(Z_{ms})$.

In practical scenarios, it is difficult to fully satisfy these conditions across all phase values. However, by allowing a slight reduction in transmission, full phase coverage can still be achieved if $\text{Im}(Y_{es})$ and $\text{Im}(Z_{ms})$ are sufficiently close to their corresponding target values [4], as presented in Figure 1 (b).

Achieving dynamic control of ϕ_τ , and thus beamsteering, requires a metasurface with reconfigurable elements such as varactors that can electronically adjust the transmission phase of the unit cells. A bow-tie antenna combined with a 3D Huygens' metasurface incorporating varactors and achieving beam steering capability of $\pm 50^\circ$ around 3.6 GHz, has been demonstrated in [3]. The 3D Huygens' metasurface used made the antenna structure bulky. To enable a more compact design, a 2D Huygens' metasurface is preferable.

References [5] and [6] present reconfigurable planar metasurfaces capable of achieving 1-bit phase quantization with a transmission magnitude above -2 and -1 dB respectively, while [7] achieves a phase coverage ranging from -90° to 150° with a transmission loss of -3 dB (in simulation).

Our objective is to design a planar metasurface that surpasses these performances in order to integrate it with the radiating elements and perform an experimental validation.

4. Conclusion

A compact MIMO antenna architecture integrating four radiating elements with a controllable Huygens' metasurface for sub-7 GHz beam steering has been proposed. The results demonstrate that by allowing a small reduction in transmission, full phase coverage can be achieved allowing beam steering.

5. Acknowledgment

This work was supported by the ANR under the France 2030 program, grant NF-PERSEUS : ANR-22-PEFT-0004.

6. References

- [1] C. A. Nour et al., Deliverable D1 - Technical Report NF-PERSEUS 2023.
- [2] N. Yu et al., Light Propagation with Phase Discontinuities: Generalized Laws of Reflection and Refraction, *Science*, vol. 334, pp. 333–337, 2011.
- [3] R. G. L. de Mello, Active and passive metasurfaces: methodology for the design of a low profile, beam-steerable, multiband, and wideband antenna, Institut polytechnique de Paris, Paris, 2022.
- [4] G. Medrar, A. C. Lepage, and X. Begaud, Huygens' Metasurfaces Analysis Through Electric and Magnetic Surface Impedance Modeling, 2025 IEEE Conference on Antenna Measurements and Applications (CAMA), Antibes, France, Nov. 2025.
- [5] K. Li and X. Gao, Broadband 1-bit active coding metasurface for transmission beam scanning, *Proc. 2022 Int. Appl. Comput. Electromagn. Soc. Symp. (ACES-China)*, pp. 1–2, Beijing, Dec. 2022.
- [6] X. Wang, P.-Y. Qin, A. T. Le, H. Zhang, R. Jin, and Y. J. Guo, Beam Scanning Transmitarray Employing Reconfigurable Dual-Layer Huygens Element, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 70, pp. 7491–7500, 2022.
- [7] K. M. R. Islam, S. M. Lee, and S. Choi, Tunable Huygens' Transmission Metasurface on Double-Layer PCB, *Proc. 2021 Int. Symp. Antennas Propag. (ISAP)*, pp. 1–2, Taipei, Oct. 2021.

Filtres SAW sur substrats composites POI : nouveaux concepts et structures disruptives

T. Baron¹, S. Karmous¹, A. Broussier¹, T. Richard¹, V. Soumann¹, W. Daniau^{1,2}, E. Courjon², F. Bernard², R. Salut^{1,2}, T. Laroche², G. Aspar², A. Clairet², S. Diaye², T. Makdissy², A. Ravesky², S. Ballandras²

¹ : FEMTO-ST, Département Temps-Fréquence, SupMicrotech-ENSMM, Besançon

² : SOITEC SA, BU Filtres, Groupe Conception et Fabrication de filtres, Besançon
 thomas.baron@femto-st.fr

Résumé

Sur la base des wafers POI (Piezo-On-Insulator) qu'elle développe et commercialise, SOITEC s'est associée avec FEMTO-ST pour développer de nouvelles structures de filtres compacts utilisant les propriétés remarquables de guide d'ondes élastiques des POI. L'utilisation de gravures pour la combinaison de transducteurs et le remplacement des miroirs de Bragg a fait l'objet de démonstrations théoriques et expérimentales présentées ici. De nouvelles perspectives s'ouvrent ainsi pour la fabrication de filtres à l'état de l'art aussi bien en termes de miniaturisation que de caractéristiques techniques.

1. Introduction

Le développement de filtres à ondes élastiques de surface (SAW) pour la téléphonie connaît un regain d'activité depuis les travaux pionniers sur la combinaison de monocristaux piézoélectriques et de silicium [1] et les premières démonstrations industrielles de ce type de substrats pour la fabrication effective de filtres [2]. Les plaques de POI produites en particulier par SOITEC [3] combinent des couches monocristallines de LiTaO_3 ou LiNbO_3 de moins d'un micromètre d'épaisseur, obtenues par adaptation du procédé Smart-CutTM adapté à ces matériaux, avec du silicium via un collage moléculaire à base de SiO_2 et une couche d'isolation Radio-Fréquence dite Trap-Rich (RF) conférant ainsi au substrat résultant des propriétés inédites en termes de qualité de guidage et de confinement d'énergie. Développé entre autres pour réduire la sensibilité des SAW aux effets de température, le POI constitue un guide d'ondes scalaires (cisaillement, compression) quasi parfait et à ce titre offre des degrés de liberté jusqu'alors interdits aux substrats piézoélectriques classiques et permet de revisiter les structures accessibles pour la fabrication de filtres innovants, compacts et compétitifs. Nous montrons ici une approche consistant à remplacer les miroirs de Bragg par des profils gravés également susceptibles de permettre des couplages acoustiques jusqu'alors inaccessibles aux concepteurs de filtres.

2. Résonateur compact sur POI à réflexion sur flancs gravés

L'objet de nos travaux est illustré en Figure 1. On y reconnaît en vue sagittale le transducteur à ondes élastiques de surface simple port classique au sein duquel nous avons remplacé les miroirs latéraux, souvent synchrones avec le transducteur et fonctionnant à la condition de Bragg, par des flancs droits sur lesquels les ondes scalaires se réfléchissent sans conversion de mode [4]. Celles-ci peuvent être de polarisations longitudinale ou transverse sans défaut de principe.

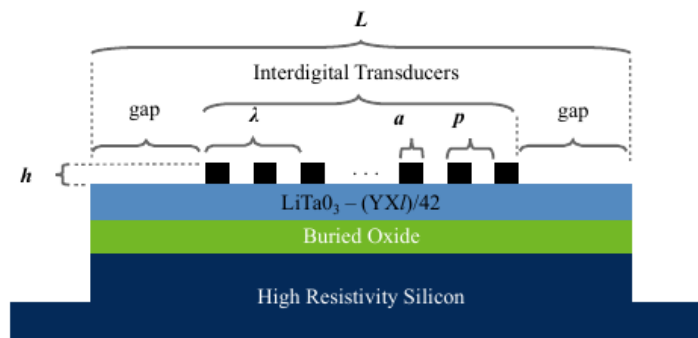


Figure 1: Schéma de la structure de résonateur à ondes de surface à réflexion sur tranches objet de l'étude

La simulation d'une telle structure en 2D tenant compte de toutes les électrodes et de la géométrie du guide est rendue particulièrement efficace par les qualités de guidage du substrat. Il s'avère en effet qu'avec un maillage comprenant les deux premières longueurs d'onde depuis la surface vers le cœur du matériau et sans conditions de rayonnement particulière, il est loisible d'obtenir des résultats théoriques fidèle à l'expérience. De tels résultats seront présentés sur l'affiche.

3. Résultats expérimentaux

L'idée des tests menés dans ce cadre était de comparer un résonateur classique, équipé de miroirs de Bragg, avec le même résonateur au sein duquel lesdits miroirs sont remplacés par des gravures s'étendant sur la zone inhomogène du guide. La réalisation technologique est présentée en Figure 2 et les mesures des réponses électriques correspondantes sont reportées en Figure 3. Elles valident le principe de fonctionnement de l'approche et donne lieu à des figures de mérite améliorées pour la version à miroirs gravés par rapport au nombre de doigts inter-digités du transducteur et à la version « Bragg ». Une étude circonstanciée des paramètres et caractéristiques correspondantes sera présentée sur l'affiche.

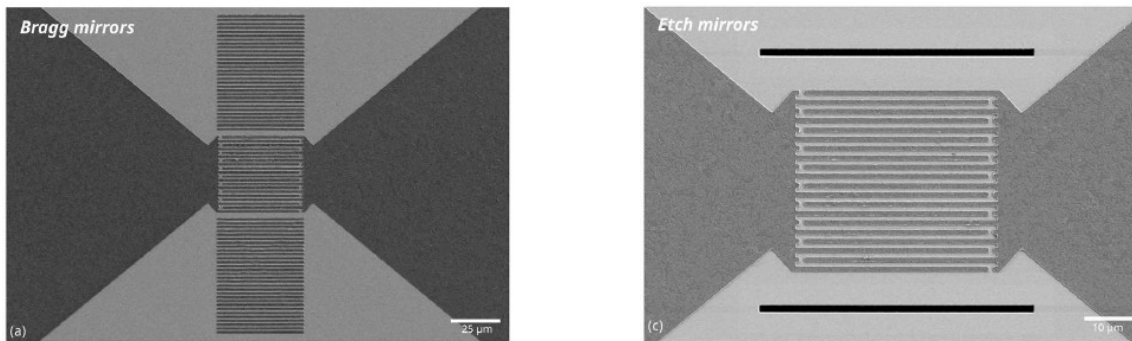


Figure 2: Photographies au microscope électronique des résonateurs à miroir de Bragg et à fronts gravés

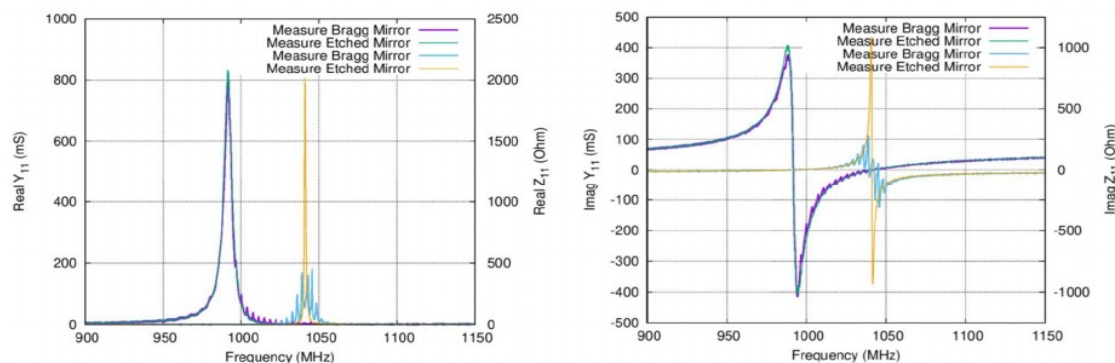


Figure 3: Mesure des réponses électriques des résonateurs de la Figure 2

4. Conclusion

Ce travail ouvre des perspectives nouvelles pour la conception de filtres compacts sur POI utilisant des concepts originaux de guidage et de couplage acoustiques. Grâce aux propriétés physiques des ondes sur POI et à des mises en œuvre technologiques simples et robustes, Il est envisageable de réaliser des filtres RF à l'état de l'art pour différentes bandes cohabitant sur une même puce et répondant ainsi aux besoins des modules de télécommunications de générations actuelle et futures.

5. Remerciements

Les auteurs remercient en particulier le programme « Important Project of Common European Interest for Micro Electronics and Communication Technologies (IPCEI/MECT) » grâce auquel ce travail a été financé par le gouvernement français. Ces travaux ont été également financés en partie par le réseau RENATECH via les ressources technologiques de l'Institut FEMTO-ST.

6. Bibliographie

- [1] T. Pasturaud et al., IEEE Trans. on UFFC, vol.54, no.4, pp.870-876, doi: 10.1109/TUFFC.2007.321.
- [2] T. Takai et al., in Proc. IEEE Int. Ultrason. Symp., pp.1–4, 2016
- [3] E. Butaud et al, 2020 50th EuMC, pp. 654-657, doi: 10.23919/EuMC48046.2021.9338169.
- [4] M. Kadota et al, IEEE Trans. on UFFC, vol. 49, no. 9, pp. 1269–1279, Sep. 2002

Métasurfaces codées et absorbantes pour la réduction de la Surface Équivalente Radar (RCS)

Y. Bouyer¹, L. Burgnies^{1,2}, V. Laur³, É. Lheurette¹

¹ : Univ. Lille, CNRS, Univ Polytechnique Hauts-de-France, UMR 8520 - IEMN
F-59000 Lille, France

² : Université du Littoral Côte d'Opale F-62100 Calais, France

³ : Université de Bretagne Occidentale, UMR 6285 – Lab-STICC F-29019 Brest, France
yohan.bouyer@univ-lille.fr

Résumé

Ce travail présente les potentialités de combiner la diffusion multiple au moyen d'une métasurface à codage de phase et l'absorption au moyen d'une couche structurée par impression 3D pour réduire la surface équivalente RADAR ou RADAR Cross Section (RCS). La conception de la métasurface est effectuée à l'IEMN en combinant la méthode numérique des éléments finis et un code d'optimisation analytique basé sur l'approche « pattern search ». La couche absorbante est réalisée au Lab-STICC par impression 3D.

1. Introduction

La réduction de RCS est une problématique très présente tant dans les domaines militaire (furtivité) que civil où il peut être nécessaire de masquer la signature électromagnétique de grandes constructions telles que portiques permanents ou éoliennes pour faciliter l'échange de données par les canaux de télécommunication sans fil. Le recours à des dispositifs absorbants est fréquemment envisagé et l'essor des métasurfaces permet de concevoir des couches absorbantes ultraminces dont les contraintes géométriques s'affranchissent en partie de la longueur d'onde de travail. Cependant, ces métasurfaces s'appuient sur des arrangements de motifs résonants et il est difficile de combiner coefficient d'absorption élevé et largeur de bande étendue. Par ailleurs, le mécanisme d'absorption se traduit par une émission dans le domaine de l'infrarouge thermique qui peut être préjudiciable pour les applications militaires. Le concept de métasurface à codage de phase proposé il y a une dizaine d'années [1] repose sur la réflexion d'un faisceau incident dans plusieurs directions de manière à limiter l'amplitude du signal réfléchi vers le détecteur. Par conséquent, son principe exploite le schéma d'interférence généré par des pixels qui présentent une phase à la réflexion de 0 ou 180° par exemple. On parle dans ce cas d'états de phase binaires « 0 » ou « 1 ». L'amplitude du signal réfléchi est unitaire et on parvient par conséquent à limiter la RCS sans recours à l'absorption. Cette idée a fait l'objet d'un précédent travail de notre équipe [2]. Cette étude a permis de limiter la RCS à -10 dB avec une largeur de bande relative de 35 %. Le travail auquel nous consacrons cette communication vise à combiner diffusion multiple et absorption dans le but de réduire davantage la RCS sans compromis sur la largeur de bande.

2. Description de la structure étudiée

La métasurface étudiée est représentée sur la figure 1. On y distingue les pixels de phase disposés dans une configuration d'échiquier. Cet arrangement, introduit bien avant l'idée des métasurfaces à codage de phase [3], permet de rediriger le faisceau incident suivant quatre directions non spéculaires. Il constitue également une structure de test pour évaluer les couplages entre pixels voisins, chacun entouré de pixels différents. Cette image montre la face cuivrée supérieure du dispositif qui est séparée d'un plan de masse uniforme par un substrat diélectrique FR4 ($\epsilon_r = 4,3$; $\tan(\delta) = 0,025$). Le domaine spectral visé regroupe les bandes X et Ku [8-18 GHz]. Chaque pixel de phase est composé de 25 cellules unitaires afin de limiter les couplages entre pixels. Ces cellules sont des disques dimensionnés en considérant la présence de la couche absorbante qui expose ces motifs élémentaires à un environnement de forte permittivité. Cette couche absorbante est élaborée par impression 3D d'une matrice de PLA chargée par des particules de carbone. Elle emprunte une structuration TPMS (Triply Periodic Minimum Surface) qui offre la possibilité d'un contrôle de la permittivité effective par la porosité. Deux exemples de cellules élémentaires 3D sont représentées en figure 1(c). Les plages de variations de permittivité et de tangente de pertes, accessibles par une structuration 3D du matériau et mesurées au Lab-STICC, sont respectivement de l'ordre de 2 à 10 et de 0,6 à 1,6.

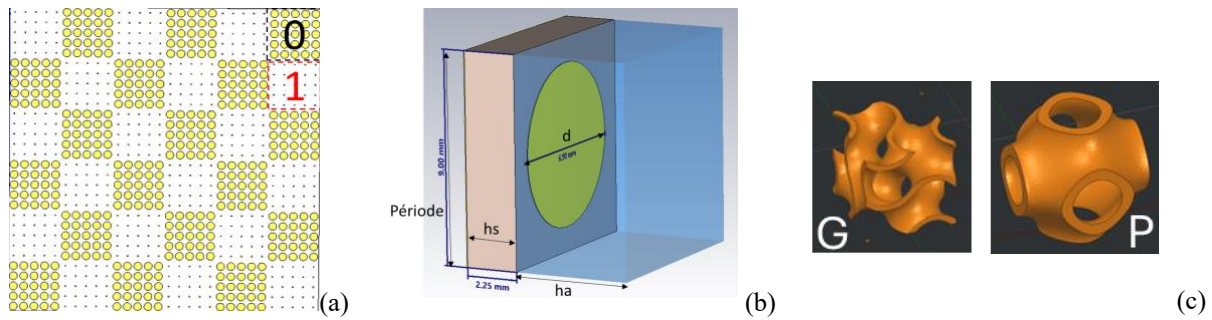


Figure 1. (a) Vue de dessus de la métasurface, (b) vue en perspective de la cellule unitaire, (c) structure gyroïde (G) et primitive de Schwarz (P) de la couche absorbante.

Pour nos simulations par éléments finis, cet absorbant sera modélisé par une couche homogène représentée en bleu sur la figure 1(b).

3. Résultats

Nous avons mené différentes études paramétriques en considérant une permittivité de couche absorbante de 1,8 pour une tangente de pertes de 0,8, correspondant aux propriétés mesurées pour une cellule de type Primitive de Schwarz ayant la plus forte porosité accessible par le procédé d'impression 3D. Le diamètre du patch « 0 » est de 5 mm et celui du patch « 1 » est de 19 mm. La figure 2 montre l'évolution de la réduction de RCS monostatique, en considérant un plan métallique de référence, en fonction de la période et de l'épaisseur du substrat.

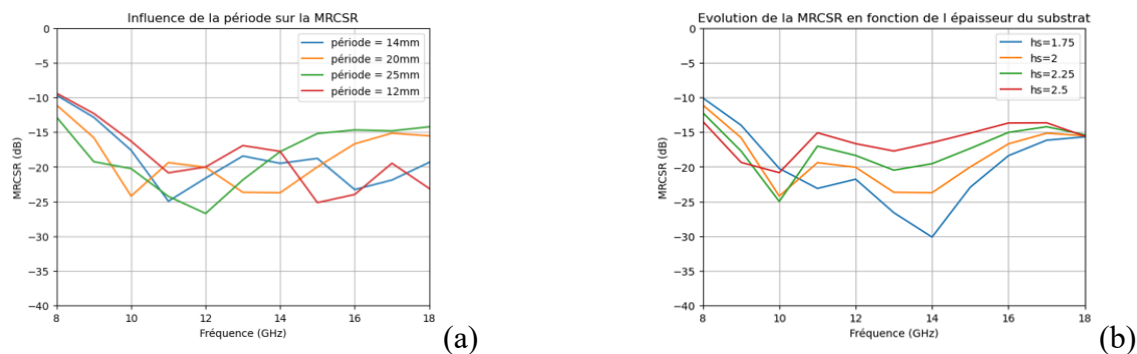


Figure 2. Variations des réductions de RCS monostatique en fonction de la période pour une épaisseur de substrat $h_s = 2,25$ mm, (a) et de l'épaisseur du substrat pour une période de cellule de 20 mm (b).

4. Conclusion

Dans cette contribution, nous avons montré l'intérêt de combiner absorption et diffusion multiple pour réduire la signature RADAR. Des niveaux de réduction de RCS monostatique inférieurs à -15dB ont été démontrés par simulation sur la quasi-totalité de la bande [8-18 GHz]. Ces premiers résultats seront complétés de caractérisations expérimentales, d'analyses bistatiques et d'études sous incidence oblique.

5. Remerciements

Ces études sont financées par le contrat ANR ASTRID CHORUS (ANR-23-ASZC-0001).

6. Bibliographie

- [1] T. J. Cui, M. Q. Qi, X. Wan, J. Zhao, and Q. Cheng, "Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials," *Light, science & applications*, vol. 3, no. 10, pp. e218–e218, 2014, doi: 10.1038/lssa.2014.99.
- [2] A. Mourad, L. Burgnies, and É. Lheurette, "Broadband RCS reduction by means of disordered coding metasurfaces," *Journal of applied physics*, vol. 134, no. 12, 2023, doi: 10.1063/5.0168686.
- [3] M. Paquay, J.-C. Iriarte, I. Ederra, R. Gonzalo, and P. de Maagt, "Thin AMC Structure for Radar Cross-Section Reduction," *IEEE transactions on antennas and propagation*, vol. 55, no. 12, pp. 3630–3638, 2007, doi: 10.1109/TAP.2007.910306.

Affiche GT5

Extension du modèle ICIM-CI aux signaux modulés en amplitude

A. Duguet^{1,2}, T. Dubois¹, G. Duchamp¹, D. Hardy², F. Salvador²

¹ : Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, IMS, UMR 5218, F-33400 Talence, France

² : Thales SIX GTS France SAS, 4 Avenue des Louvresses, 92230 Gennevilliers

antoine.duguet@ims-bordeaux.fr

Résumé

L'objectif de cette contribution est de présenter une méthodologie permettant l'exploitation de la modélisation ICIM-CI (Integrated Circuits Immunity Model – Conducted Immunity) pour traduire le comportement d'un amplificateur opérationnel (AOP) monté en suiveur soumis à des signaux d'interférence modulés en amplitude (AM). Lorsque l'entrée du circuit est soumise à des signaux d'interférence AM, sa tension de sortie varie en suivant l'enveloppe du signal d'interférence. L'amplitude de cette variation dépend de la fréquence de cette enveloppe. A l'heure actuelle, le modèle ICIM-CI n'est pas prévu pour prendre en compte cette dépendance en fréquence. Afin de remédier à cette limitation, nous proposons d'intégrer au modèle ICIM-CI une fonction de transfert, extraite expérimentalement à l'aide d'un nouveau banc de caractérisation basé sur la méthode DPI (Direct Power Injection).

1. Introduction

Dans l'environnement électromagnétique d'un objet électronique nous trouvons diverses sources de d'interférence comme les systèmes de radiodétection ou encore les armes à énergie dirigées. Les signaux générés par ces sources sont principalement caractérisés par des impulsions modulées en amplitude [1]. Dans le cadre des études CEM (compatibilité électromagnétique), particulièrement dans les études de susceptibilité, la modélisation a pour but de prédire les dysfonctionnements et les dommages causés par une interférence électromagnétique (IEM) extérieure sur les composants électroniques. Il existe plusieurs approches de modélisation, dont la modélisation ICIM-CI [2], traduisant le comportement en susceptibilité d'un circuit électronique exposé à des signaux d'interférence conduits purement sinusoïdaux (CW). Le modèle ICIM-CI est basé sur deux blocs dont l'un représente le chemin de couplage (PDN) de l'IEM jusqu'à la partie active de l'élément sous test et l'autre représente sa caractéristique de susceptibilité (IB). Ces deux blocs sont construits à partir de résultats expérimentaux de caractérisation de la susceptibilité. A notre connaissance, de nombreuses études utilisent le modèle ICIM-CI pour la modélisation de la susceptibilité d'objet électroniques en CW. En revanche, aucune ne propose de l'employer dans le cas d'IEM modulées en amplitude. Ainsi, dans cette contribution, nous présentons une extension du modèle ICIM-CI aux signaux d'interférence modulés en amplitude.

2. Description du problème et solution proposée

Le circuit considéré dans le cadre de cette étude est amplificateur opérationnel (AOP) monté en suiveur, dont le schéma électrique est présenté en Figure 1a et une photo est donnée en Figure 1b.

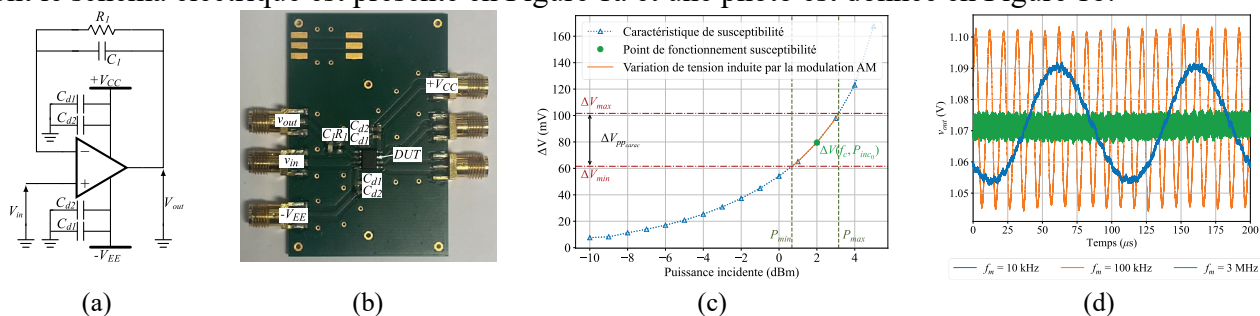


Figure 1 : Montage AOP (a) schéma électrique, (b) photo, (d) estimation de la réponse du montage soumis à des signaux AM à partir de son IB, (c) mesure de sa réponse face à des signaux AM

Lors de l'injection en entrée de ce circuit d'un signal d'interférence modulé en amplitude par un signal sinusoïdal, un mécanisme de détection d'enveloppe [3] provoque l'apparition en sortie d'une variation de tension, noté ΔV , suivant l'enveloppe sinusoïdale du signal d'interférence. Pour des fréquences basses de l'enveloppe du signal d'interférence, l'amplitude du signal de sortie peut être modélisée par le modèle ICIM-CI en suivant la méthodologie classiquement employée, notamment grâce à la mesure

du ΔV en fonction de la puissance incidente du signal d'interférence purement sinusoïdal utilisé dans l'extraction du bloc IB (Figure 1c). Pour des fréquences hautes de l'enveloppe du signal d'interférence, l'amplitude du signal de sortie du circuit AOP dépend de la fréquence d'enveloppe de l'IEM (Figure 1d) et ne peut donc plus être déterminé par le modèle ICIM-CI. Le modèle ICIM-CI, tel qu'il est défini en CW (continus wave), n'a pas suffisamment d'information pour traduire ce comportement. Pour remédier à cela, nous proposons d'intégrer au modèle ICIM-CI un bloc modélisant la dynamique de détection d'enveloppe (Figure 2a) permettant de traduire la variation de réponse du circuit AOP en fonction de la fréquence de l'enveloppe (signal modulant) du signal d'interférence. Sa fonction de transfert est extraite expérimentalement à l'aide du banc illustré en Figure 2b.

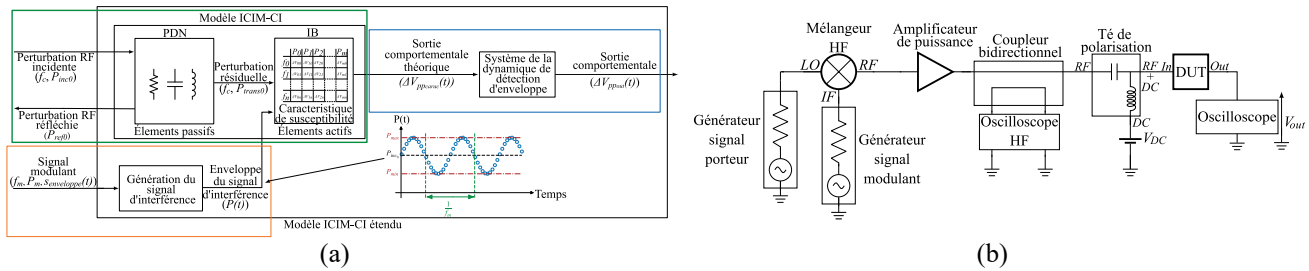


Figure 2 : (a) Modèle ICIM-CI étendu pour tenir compte des interférences AM, (b) banc d'extraction du modèle ICIM-CI amélioré

3. Résultats

Après avoir identifié l'expression analytique de la fonction de transfert de la dynamique de détection d'enveloppe mesurée, dont le gain est représenté en Figure 3a, elle est intégrée au modèle ICIM-CI du circuits AOP. Afin de valider le modèle ICIM-CI étendu aux signaux modulé en amplitude, le signal d'interférence de la Figure 3b est injecté à l'entrée du circuit AOP. La Figure 3c présente alors l'évolution de la tension mesurée et simulée en sortie du circuit AOP. Malgré quelques différences minimales, la modèle permet de reproduire fidèlement le comportement du montage face à des impulsions AM.

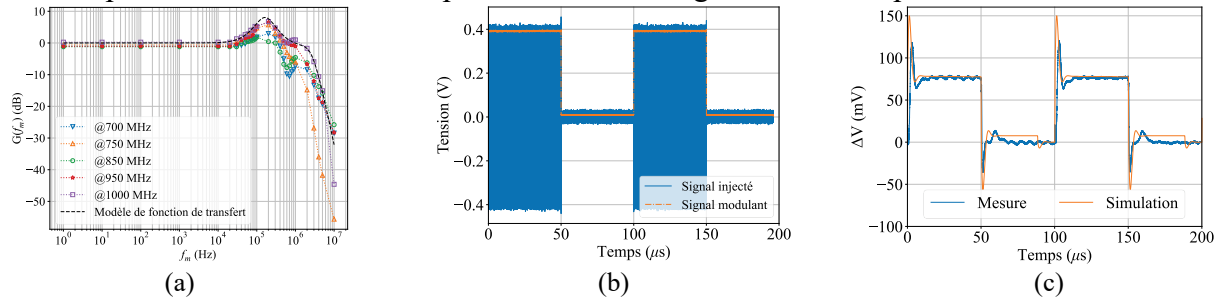


Figure 3 : (a) Gain de la fonction de transfert de la dynamique de détection d'enveloppe, (b) signal d'interférence injecté à l'entrée du montage AOP, (c) réponse mesurée et simulée du montage AOP

4. Conclusion

Dans cette contribution, nous avons proposé une méthodologie d'exploitation de la modélisation ICIM-CI pour simuler le comportement d'un AOP monté en suiveur face à des signaux d'interférence modulés en amplitude. Pour cela nous avons proposé l'ajout d'une fonction de transfert au modèle ICIM-CI, extrait via l'utilisation d'un nouveau banc de caractérisation basé sur la méthode DPI.

6. Bibliographie

- [1] F. Sabath, E. L. Mokole, and S. N. Samaddar, "Definition and classification of ultra-wideband signals and devices," *URSI Radio Science Bulletin*, vol. 2005, no. 313, pp. 12–26, Jun. 2005, doi: 10.23919/URSIRSB.2005.7909522.
- [2] IEC, "IEC 62433-4: integrated circuit - EMC IC modeling - Part 4: Models of Integrated Circuits for EMI behavioral simulation, Conducted Immunity Modeling (ICIM-CI)."
- [3] J.-M. Redouté and M. Steyaert, *EMC of Analog Integrated Circuits*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2010. doi: 10.1007/978-90-481-3230-0.

METHODES DE MAILLAGE CONFORME EN FDTD-PIC POUR LA RESOLUTION DES EQUATIONS DE MAXWELL ET DE VLASOV AFIN DE SIMULER L'EVOLUTION D'UN CHAMP ELECTROMAGNETIQUE ET D'UN PLASMA FORTEMENT COUPLES

Louis Garbaye, Christophe Guiffaut, Alain Reinex, Matthieu Bonilla

*Laboratoire Xlim,
 Société Nuclétudes,
louis.garbaye@xlim.fr*

1. Introduction

Dans le domaine de l'électromagnétisme, nous résolvons classiquement les équations de Maxwell avec la méthode FDTD. Un inconvénient de cette méthode est d'utiliser des marches d'escalier, pour mailler les surfaces courbes ou non alignées avec la grille cartésienne. Cette approche introduit des erreurs dans le calcul des champs. Les méthodes conformes FDTD ont été introduites, [1] [2] [3], dans le but de diminuer ces erreurs en utilisant une meilleure approximation des surfaces par un maillage dit conforme.

Le but est d'utiliser ces méthodes conformes pour la méthode FDTD-PIC, utilisée pour simuler l'évolution d'un champ électromagnétique couple à un plasma. Cette approche permet de résoudre le système de Maxwell-Vlasov, c'est à dire les équations de Maxwell couplées avec les équations traduisant la dynamique des particules soumise à l'action du champ électromagnétique.

2. Description du cas test étudié

Nous considérons une cavité cubique métallique, que nous inclinerons à 45 degrés pour utiliser les méthodes conformes. Le but de ce cas test étant de calculer le champ électromagnétique lorsque des électrons sont arrachés d'une paroi métallique de la cavité. Pour cela nous utilisons la méthode FDTD-PIC pour résoudre les équations de Maxwell-Vlasov qui se décompose, à chaque itération temporelle, en plusieurs étapes :

1. Emission / Absorption des macro-particules sur / depuis les surfaces métalliques.
2. Collecteur : calcul du courant généré par le déplacement des macro-particules.
3. Calcul du champ électromagnétique.
4. Interpolation du champ électromagnétique aux positions des macro-particules.
5. Pousseeur : calcul des positions et vitesses des macro-particules.

Nous allons utiliser les méthodes conformes FDTD dans l'étape 3, cependant l'utilisation du maillage conforme impacte directement les étapes 1 et 4. Nous allons voir comment modifier ces étapes et quelles sont les conséquences de ces modifications en gardant en tête un point technique important de la méthode FDTD-PIC : la conservation de la charge.

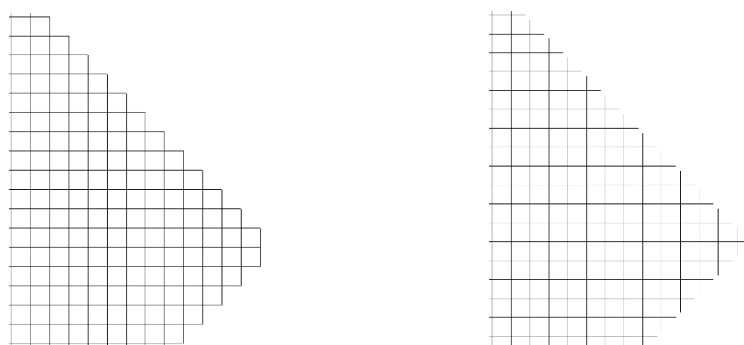


Figure 1 : Comparaison maillage cartésien FDTD et maillage conforme CFDTD

3. Résultats

Emission et Absorption pour les méthodes conformes FDTD-PIC conservant la charge

Dans un premier temps, nous avons considéré un seul électron, c'est-à-dire une seule macro-particule de la charge d'un électron q_e , que nous avons émise depuis la paroi conforme de la cavité. En observant la charge présente sur les parois métalliques de la cavité, calculée par l'équation de Maxwell-Gauss, nous avons observé que celle-ci n'était pas égale à l'opposé de la charge de l'électron. D'après [4], pour conserver la charge il suffit d'effectuer un déplacement supplémentaire au moment de l'émission et de l'absorption de la macro-particule depuis ou jusqu'à un nœud métallique ou une face métallique.

	Théorique	Parois conformes	Nœud PEC	Face PEC
Charge après émission	q_e	$6,4077 \times 10^{-19}$	$1,6019 \times 10^{-19}$	$1,6019 \times 10^{-19}$
Charge après absorption	0	$2,4003 \times 10^{-20}$	$1,5262 \times 10^{-34}$	$1,5262 \times 10^{-34}$

Tableau 1 : Valeurs de la charge présente sur les parois métalliques de la cavité

Nous pouvons remarquer que si aucun déplacement n'est ajouté à l'émission / à l'absorption la totalité de la charge de la macro-particule n'est pas arrachée / absorbée, créant un champ électrostatique proche de la position d'émission et d'absorption.

Validation théorique

Pour démontrer que cette approche permet de conserver la charge, nous avons repris la Continuité de la Trace du Courant (CTC) de C. Guiffaut utilisée dans le modèle des fils en biais en adaptant le fil au déplacement complet de la macro-particule. La CTC est une équation qui doit être vérifiée pour chaque nœud du maillage, elle découle de l'équation de conservation de la charge et fait intervenir les coefficients utilisés pour calculer le courant généré par les macro-particules dans l'étape 2.

Interpolation du champ électromagnétique

Dans un second temps, nous avons émis plusieurs centaines de macro-particules à chaque itération durant un quelques nanosecondes. En utilisant l'interpolation de la méthode FDTD-PIC, nous avons constaté que l'allure du nuage particulaire n'était pas uniforme à cause de l'inclinaison de la cavité. Pour corriger cela, nous avons implémenté une pondération utilisant certaines données du maillage conforme.

4. Conclusion

Nous avons montré qu'il était possible d'utiliser les méthodes conformes FDTD existantes pour la méthode FDTD-PIC en modifiant certaines étapes dans le but de maintenir la conservation de la charge.

5. Bibliographie

- [1] S. Dey and R. Mittra, A Locally Conformal Finite-Difference Time-Domain (FDTD) Algorithm for Modeling Three-Dimensional Perfectly Conducting Objects, *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, septembre 1997.
- [2] S. Benkler and N. Chavannes and N. Kuster, A new 3-D conformal PEC FDTD scheme with user-defined geometric precision and derived stability criterion, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, juin 2006.
- [3] T. Xiao and Q. H. Liu, Enlarged Cells for the Conformal FDTD Method to Avoid the Time Step Reduction, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, novembre 2011.
- [4] J. Loverich and C. Nieter, Charge conserving emission from conformal boundaries in electromagnetic PIC simulations, mai 2010.

Analyse des impulsions CW en chambre réverbérante incluant la VIRC pour des tests de susceptibilité rayonnée

T. Guyomard¹, G. Andrieu¹, T. Dubois²

1 : XLIM / Univ. Limoges - 2 : IMS / Univ. Bordeaux

teddy.guyomard@xlim.fr

Résumé

Nous caractérisons l'excitation CW impulsif en chambres réverbérantes, incluant la VIRC, et proposons un cadre prédictif minimal reliant l'enveloppe moyenne aux paramètres modaux de la cavité. Les grandeurs issues des S-paramètres alimentent un modèle à trois zones distinguant les régimes transitoires et le plateau. La fidélité est évaluée par des métriques de similarité temporelle et structurelle. Les observations montrent qu'un lien direct entre paramètres modaux et enveloppe permet une prédiction fiable, tandis que le chargement absorbant et l'agitation intrinsèque stabilisent la réponse et rationalisent la procédure. Ce cadre fournit un guide opérationnel pour des essais de susceptibilité rapides, reproductibles et traçables en environnement réverbérant.

Mots-clés : Signal pulsé, Facteur Q, Chambre réverbérante, VIRC, Coefficient de Pearson.

1. Introduction

Les essais de susceptibilité rayonnée en chambre réverbérante constituent un cadre efficient pour évaluer la robustesse électromagnétique des systèmes tout en préservant la représentativité des environnements opérationnels. Parmi les schémas d'excitation, le pulsed-CW offre un compromis pertinent entre sélectivité spectrale et pertinence fonctionnelle, mais ses caractéristiques temporelles restent encore insuffisamment documentées en contexte réverbérant.

Cette étude vise à établir un cadre prédictif compact reliant l'enveloppe temporelle moyenne du signal reçu au facteur de qualité de celle-ci tout en s'appuyant sur des métriques pour quantifier la fidélité du signal mesuré par rapport à celui injecté.

Différentes configurations sont étudiées une lorsque la chambre réverbérante n'est pas chargée et une autre ou celle-ci est chargée avec 2 blocs de 30 absorbants ayant une surface au sol de 200 cm².

2. Méthodes / Setup

L'étude a été menée dans 2 chambres réverbérantes au sein du laboratoire XLIM. Une chambre réverbérante à brassage de modes (CRBM) présentée figure 1 avec un volume $V = 21,5 \text{ m}^3$ et l'autre étant une chambre réverbérante vibrante d'un volume $V = 13,1 \text{ m}^3$. Le signal injecté est présenté figure 2 c'est une impulsion de 5 μs couplé à un signal CW de fréquence 2 GHz avec une répétition de 1 ms pour un total de 180 positions de brassage différentes.

Le plateau du signal moyen peut-être prédit en utilisant les paramètres S et en formalisant le système par un quadripôle sur 50 Ω , ce qui permet de prédire la relation du plateau à cette équation :

$$V_2 = \frac{E_g * \langle |S_{21}| \rangle}{2} \quad (1)$$

E_g étant la puissance injectée et $\langle |S_{21}| \rangle$ le résultat pour une fréquence donnée lors de la mesure du facteur Q.

Les zones transitoires peuvent se prédire en utilisant deux lois exponentielles qui sont reliés à la constante de la chambre qui est défini comme suivants :

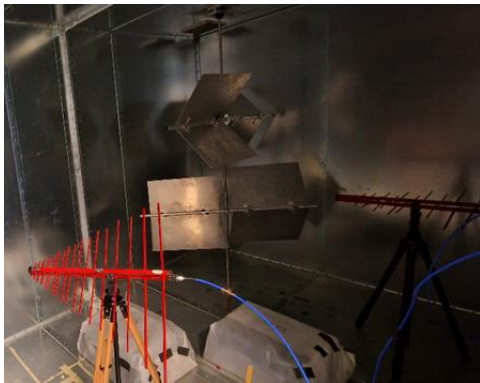


Figure 1 : Chambre réverbérante à brassage de modes

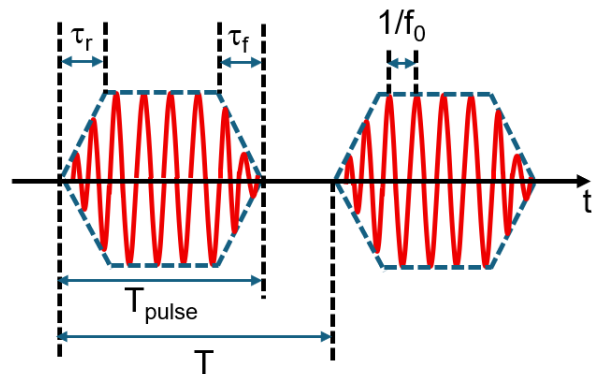


Figure 2 : Signal impulsionnel

3. Résultats

- Prédiction de l'enveloppe moyenne avec le facteur Q : écart $\leq 0,7$ dB μ V.
- Effet des absorbants \rightarrow meilleure prédiction du signal.
- Fidélité (1 étant la superposition à l'identique) : Pearson $\approx 0,84$ sans absorbants dans la CRBM à 0.93 pour la VIRC & 0,96 à 0.97 avec 60 absorbants.

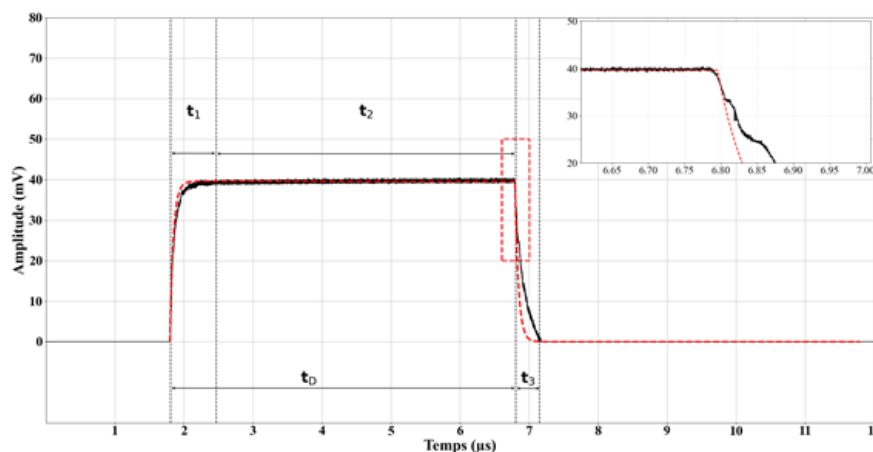


Figure 3 : Résultats dans la VIRC avec 60 absorbants. La courbe rouge représente la prédiction avec le facteur Q et la courbe en noire représente la mesure.

4. Conclusion

Nous proposons un cadre prédictif reliant enveloppe et paramètres modaux pour des essais rapides et reproductibles en chambre réverbérante. Le chargement et la VIRC stabilisent la réponse et simplifient la procédure. Des extensions sont envisagées vers d'autres formes d'impulsions, bandes et configurations de chargement.

Références

- [1] T. Artz & H. Hirsch, "Pulsed signals in reverberation chambers: Experimental analysis of transient peaks," *Proc. 2013 Int. Symp. on EMC*, 2013.
- [2] Reverberation chamber test methods," *Int. Electrotech. Commiss. Stan-dard IEC 61000-4-21:2011*, January 2011.
- [3] F. Leferink, J.-C. Boudenot, and W. van Etten, "Experimental results obtained in the vibrating intrinsic reverberation chamber," in *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Symposium Record (Cat. No.00CH37016)*, vol. 2, 2000

Augmentation de la dynamique de mesures non invasives d'efficacité de blindage à l'aide d'une VIRC

Q. Jacquet¹, G. Andrieu¹, P. Besnier², L. Vollet³, M. Romero-de-la-Osa⁴

¹ : Laboratoire Xlim, Université de Limoges, France

² : Université de Rennes, France

³ : Michelin Inflatable Solutions, France

⁴ : Manufacture Française des Pneumatiques Michelin, France
quentin.jacquet@xlim.fr

Résumé

Cette étude porte sur l'impact du nombre de configurations de brassage sur la mesure non invasive de l'efficacité de blindage d'enceintes métalliques. Cette méthode non invasive repose sur l'estimation de facteurs de qualité (Q) d'une chambre réverbérante (CR). Les résultats expérimentaux obtenus en chambre réverbérante à brassage de modes (CRBM) et en chambre réverbérante vibrante (VIRC) montrent qu'une augmentation du nombre de configurations améliore la précision des mesures et permet d'augmenter la dynamique afin de mesurer des valeurs d'efficacité de blindage plus élevées, en particulier dans la VIRC.

1. Introduction

L'efficacité de blindage (SE) décrit la capacité d'une enceinte métallique à limiter la pénétration des ondes électromagnétiques. Les méthodes traditionnelles de mesure sont souvent invasives [1] et peuvent modifier les propriétés électromagnétiques du dispositif testé. Une approche non invasive, basée sur la mesure successive de trois facteurs de qualité (Q_0 , Q_1 , Q_2), a récemment été proposée [2]. Cette étude porte sur l'impact du nombre de configurations de brassage sur la dynamique de mesure de l'efficacité de blindage, avec une comparaison entre CRBM et VIRC.

2. Méthodologie expérimentale

La cavité testée est une boîte métallique dont le couvercle comporte trois ouvertures. Huit absorbants pyramidaux sont disposés successivement à l'extérieur puis à l'intérieur de cette cavité afin de mesurer les différents facteurs Q (respectivement Q_1 et Q_2) de la chambre réverbérante [3]. À partir de ces mesures, l'efficacité de blindage est ensuite calculée.

Les expériences sont réalisées dans une CRBM et dans une VIRC entre 1 GHz et 4 GHz. Dans la CRBM, le brassage des modes est assuré par un brasseur métallique rotatif, tandis que dans la VIRC, il repose sur le mouvement aléatoire de ses parois métallisées. Les mesures sont répétées pour différentes valeurs du nombre de configurations de brassage.

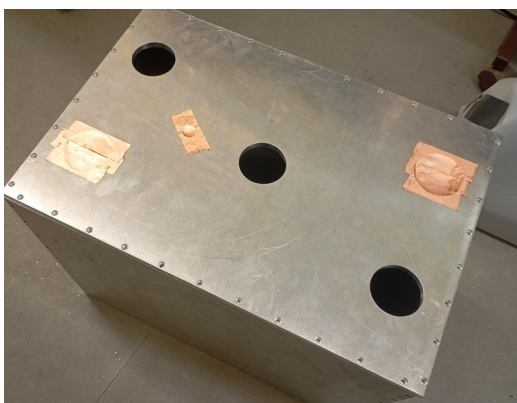


Figure 1 : Cavité sous test



Figure 2 : Exemple de mesure en VIRC

3. Résultats

Les résultats montrent que l'augmentation du nombre de configurations de brassage améliore la stabilité des mesures de facteurs Q et permet d'estimer l'efficacité de blindage avec plus de précision. Dans la VIRC, l'accroissement du nombre de configurations permet d'augmenter significativement la dynamique de mesure et de réduire les incertitudes liées aux valeurs de Q_2 proches de Q_0 . Comparée à la CRBM, la VIRC offre plus de configurations indépendantes sans déplacement de la cavité, ce qui permet d'atteindre une meilleure estimation de l'efficacité de blindage.

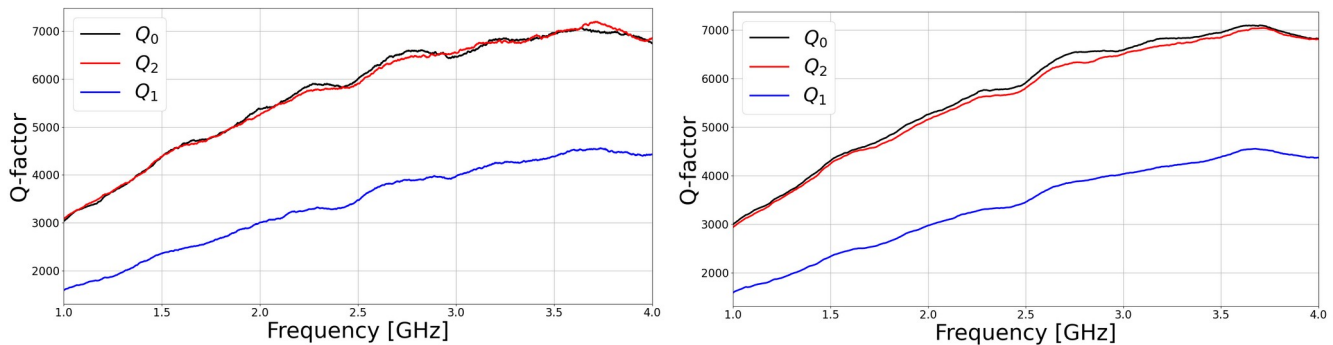


Figure 3 : Facteurs Q mesurés pour 100 (à gauche) et pour 1000 (à droite) configurations de brassage

4. Conclusion

Cette étude met en évidence l'importance du nombre de configurations de brassage lors des mesures d'efficacité de blindage avec la méthode non invasive proposée. La VIRC se révèle particulièrement adaptée, car elle fournit un grand nombre d'échantillons indépendants, garantissant des mesures plus précises et une dynamique supérieure à celle obtenue avec la CRBM.

5. Bibliographie

- [1] IEEE Std 299-2006, *IEEE Standard Method for Measuring the Effectiveness of Electromagnetic Shielding Enclosures*, 2007.
- [2] P. Besnier et al., *High-Frequency Estimation of Shielding Effectiveness Without Inner Sensor in Reverberation Chambers*, IEEE Trans. EMC, 2024.
- [3] P. Besnier, C. Lemoine, J. Sol, *Various estimations of composite Q-factor with antennas in a reverberation chamber*, IEEE EMC Symposium, 2015.

Amélioration des performances d'absorbants micro-ondes à base de composites silicone structurés grâce à la gravure laser.

G. DANIELOU^{1,2}, O. LAMRINI¹, H. BREISS¹, L. AMORY³, P. POULIGUEN³, A. SHARAIHA¹, R. ADAM², L. BERNARD^{1,2}, R. BENZERGA¹

¹ : Univ Rennes, CNRS, IETR-UMR 6164, F-35000 Rennes, France,

² : Institue franco-allemand de recherche de Saint Louis, F-68300 Saint Louis, France,

³ : Agence de l'Innovation de Défense, Ministère des armées, F-75509 Paris, France
 gwenvael.danielou@univ-rennes.fr

Résumé

Ce travail présente l'optimisation de la mise en forme d'un matériau absorbant souple, fonctionnant dans la gamme des hyperfréquences. Le composite, à base de silicone chargé en fibres de carbone (FC) courtes (100 μm) est structuré par gravure laser pour former un métamatériau absorbant organique à large bande de fonctionnement.

1. Introduction

Des progrès significatifs ont récemment été réalisés dans le développement de nouveaux matériaux absorbants pour les micro-ondes afin de répondre aux exigences des diverses applications. Pour obtenir une absorption sur une large bande de fréquences, les mousses polymères chargées avec des particules à pertes diélectriques ou magnétiques constituent une solution pour obtenir des performances électromagnétiques (EM) intéressantes tout en conservant une faible densité. Cependant, leur utilisation est souvent limitée par leur épaisseur importante, notamment pour un fonctionnant aux "basses" fréquences, typiquement de quelques GHz.

Par ailleurs, l'utilisation des métamatériaux en tant qu'absorbants EM apparait comme une solution pour réduire l'épaisseur de ces absorbants. Néanmoins, ces structures présentent généralement une absorption à bande étroite (absorbants résonants) ainsi qu'une rigidité, induite par l'utilisation de substrats diélectriques rigides, qui rend difficile leur conformation aux surfaces non planes [1], [2].

Récemment, des absorbants à métamatériaux émergent dans la littérature, élaborés par exemple, par fabrication additive [3]. Certains présentent une certaine flexibilité liée au matériau utilisé [4] ou, le plus souvent, à la très faible épaisseur de substrat [5].

Dans le présent travail, nous proposons un composite souple, structuré par gravure laser, pour l'élaboration d'un absorbant fin, léger et fonctionnant dans la gamme 8 à 18 GHz.

2. Description du composite étudié

Le composite est élaboré à partir d'une résine silicone chargée avec 15 % en masse de FC courtes (100 μm). Il présente une conductivité relativement faible ($\approx 1 \text{ S/m}$), à comparer à celle d'un métal tel que le cuivre ($\approx 60 \times 10^6 \text{ S/m}$). La méthode d'élaboration du composite est détaillée dans [6]. Par la suite, le matériau est gravé par laser pour réaliser des structures résonantes (Fig. (1-a)), formant ainsi un métamatériau absorbant organique. Dans un premier temps, une gravure par laser KrF a permis de fabriquer un prototype d'absorbant, démontrant la preuve de concept. Toutefois, ce procédé présente deux limitations : - une vitesse de gravure très lente ($\approx 6 \text{ h}$ par motif résonant, soit plusieurs jours pour un prototype de $150 \times 150 \text{ mm}^2$), et - une profondeur de gravure limitée (épaisseur maximale $\approx 1 \text{ mm}$). Afin de surmonter ces contraintes, un laser CO_2 a été utilisé à la place du laser KrF, permettant d'augmenter à la fois la vitesse de gravure et l'épaisseur du matériau pouvant être structuré.

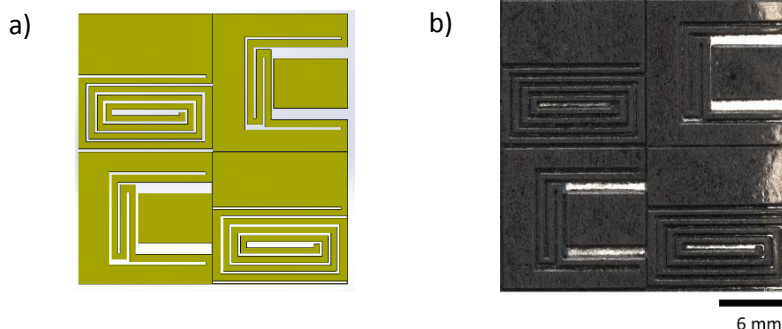


Figure 1. a) Schéma d'un motif résonant (dimensions 12.5x12.5 mm²) et b) exemple d'un motif de composite gravé par laser CO₂.

3. Résultats

Les mesures réalisées en chambre anéchoïque sur des prototypes de 1 mm d'épaisseur en silicone gravé ont montré que les performances d'absorption sont comparables entre la gravure au laser CO₂ et au laser KrF. La seule différence notable réside dans un décalage du pic d'absorption, indiquant un élargissement de la bande de fonctionnement de l'absorbant. Le prototype gravé au laser CO₂ présente une bande d'absorption ($\Gamma < -10$ dB) comprise entre 8.75 et 18 GHz, tandis que celui gravé au laser KrF n'absorbe efficacement qu'à partir de 11.5 GHz (Fig. 2). Par ailleurs, grâce à l'utilisation du laser CO₂, l'épaisseur maximale gravable a pu être portée à 1.75 mm. Le prototype correspondant montre une bande d'absorption élargie à partir de 7.75 GHz au lieu de 8.75 GHz (Fig. 2).

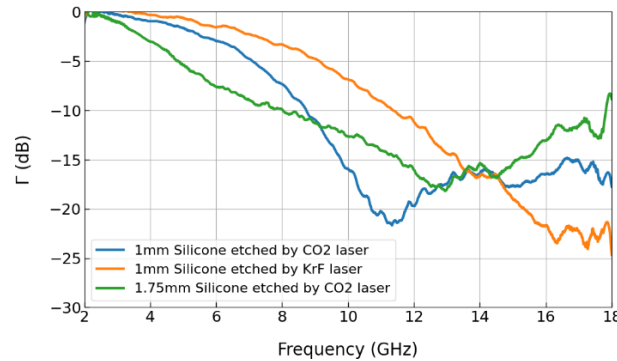


Figure 2. Mesures des prototypes en silicone de 1 mm et du prototype de 1.75mm d'épaisseur

4. Conclusion

Dans cette contribution, nous avons mis en évidence l'intérêt de l'utilisation d'un laser CO₂ qui permet, d'une part, une gravure rapide du prototype, et d'autre part, d'augmenter l'épaisseur maximale de l'échantillon pouvant être utilisé. Le prototype final, d'une épaisseur de 1.75 mm présente une bande d'absorption élargie couvrant la gamme 7.75 - 18 GHz.

5. Remerciements

Ce travail a été cofinancé par la Direction générale des Armées, via l'Agence de l'innovation de défense (AID), et soutenu dans le cadre du projet ANR AMBITION du programme ASTRID. Les recherches ont bénéficié des équipements des plateformes MATRIX et M2ARS de l'IETR, Université de Rennes, infrastructures elles-mêmes soutenues et financées par l'Union européenne, le Fonds européen de développement régional (FEDER) ainsi que, dans le cadre du projet CPER Mat&Trans, par le ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, la Région Bretagne, le Département des Côtes-d'Armor et Saint-Brieuc Armor Agglomération.

6. Bibliographie

- [1] G. Deng *et al.*, « An Ultrathin, Triple-Band Metamaterial Absorber with Wide-Incident-Angle Stability for Conformal Applications at X and Ku Frequency Band », *Nanoscale Res. Lett.*, vol. 15, n° 1, p. 217, 2020, doi: 10.1186/s11671-020-03448-0.
- [2] Q. Huang *et al.*, « Metamaterial electromagnetic wave absorbers and devices: Design and 3D microarchitecture », *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 108, p. 90- 101, 2022, doi: 10.1016/j.jmst.2021.07.055.
- [3] N. Abdelal *et al.*, « Armadillo shell-inspired carbon nanotubes-epoxy composites developed using 3D printing for electromagnetic interference shielding », *Addit. Manuf.*, vol. 71, p. 103599, 2023, doi: 10.1016/j.addma.2023.103599.
- [4] Y. Gao *et al.*, « A transparent broadband flexible metamaterial absorber for radar infrared-compatible stealth », *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 57, n° 15, p. 155102, 2024, doi: 10.1088/1361-6463/ad1dbe.
- [5] M. Anjali *et al.*, « Flexible bandwidth-enhanced metamaterial absorbers with epoxy/graphene nanoplatelets-silver nanowire polymer composites as substrates », *Compos. Sci. Technol.*, vol. 249, p. 110492, 2024, doi: 10.1016/j.compscitech.2024.110492.
- [6] H. Breiss, « Composites chargés en fibres longues de carbone pour l'absorption en basses fréquences », Thèse de doctorat, Rennes 1, 2022

Analyse comparative entre mesures expérimentales et simulations pour l'évaluation d'un modèle numérique de fente appliqué à différentes topologies

C. Guiffaut¹, T. Picon², C. Zuber², C. Pouant², Y. Daudy²

¹ : Laboratoire XLIM, Limoges, France

² : Commissariat à l'Énergie Atomique, DAM
christophe.guiffaut@xlim.fr

Résumé

Nous présentons les résultats obtenus lors d'une campagne expérimentale de mesure de fonctions de transfert sur différents types de fente sur la bande de fréquence 100 MHz – 1 GHz. Des fentes avec différentes formes, largeurs et épaisseurs sont testées. Ces essais permettront de valider un nouveau modèle de fente développé par le laboratoire XLIM grâce à des comparaisons entre des simulations et les résultats de cet essai. Ce modèle de fente permet d'obtenir des résultats rapidement comparés aux modèles 3D.

1. Introduction

La modélisation des fentes et joints dans les méthodes de résolution sur maillage soulève deux problématiques, la première sur la singularité locale du champ et la seconde sur son caractère multi-échelle. Elles ont fait l'objet d'un nombre insuffisant d'études pour représenter la diversité des géométries rencontrées sur les enceintes faradisées. Principales sources de pénétration du champ dans les cavités, leur modélisation par du raffinement de maillage est très couteuse quelle que soit la méthode de résolution sur maillage (FEM, IE, FDTD). La méthode FDTD possède toutefois deux atouts exploités en premier par Holland [1] : la capacité à intégrer des singularités d'arête sans raffiner le maillage et la modélisation des fentes et des fils par des modèles subcellulaires. Cette approche allège considérablement le coût de calcul et reste d'une précision équivalente à celles impliquant un fort raffinement de maillage. Dans cette étude, nous confrontons le modèle subcellulaire de fente mince le plus abouti [2], [3] pour la méthode FDTD avec des mesures sur une cavité de forme cylindrique. Différents designs de fente sont proposés et nous présentons ici la première phase de comparaison.

2. Description de la structure étudiée

Lors de l'étude, sept types de fentes de largeur et d'épaisseurs variées ainsi que de différentes topologies ont été étudiés. Ces sept motifs sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Type de fentes	Caractéristiques	Photos	Type de fentes	Caractéristiques	Photos
Fente I	Longueur = 100 mm Largeur = 1 mm Épaisseur = 1 mm		Fente II	Longueur fente verticale = 100 mm Largeur = 1 mm Épaisseur = 1 mm	
Fente I	Longueur = 100 mm Largeur = 1 mm Épaisseur = 4 mm		Fente U	Longueur fente verticale = 50 mm Longueur fente horizontale = 50 mm Largeur = 1 mm Épaisseur = 1 mm	
Fente I	Longueur = 100 mm Largeur = 4 mm Épaisseur = 1 mm		Fente T	Longueur fente verticale = 100 mm Longueur fente horizontale = 100 mm Largeur = 1 mm Épaisseur = 1 mm	
Fente I	Longueur = 100 mm Largeur = 4 mm Épaisseur = 4 mm				

Tableau 1 : Caractéristiques des différentes topologies de fentes

Lors de l'essai, les fentes ont été intégrées au couvercle d'un bidon totalement fermé d'un point de vue EM. L'idée de l'essai est de mesurer la fonction de transfert entre le champ sans le bidon et le champ à l'intérieur du bidon, qui est fermé par le couvercle fendu. Une cellule GTEM (figure 1) a permis de réaliser ces acquisitions sur la bande de fréquence 100 MHz – 1 GHz. Celle-ci permet d'appliquer une onde plane maîtrisée sur l'objet sous test. Afin de maximiser la fonction de transfert, le champ E est polarisé perpendiculairement à la fente. Les mesures du champ incident (en l'absence de la maquette) et du champ à l'intérieur de la maquette sont réalisées

avec une chaîne électro-optique. Toutes les mesures sont référencées à la source de l'analyseur de réseau. Le rapport de ces mesures sur le champ incident permet ainsi d'obtenir des fonctions de transfert en grandeur complexe.

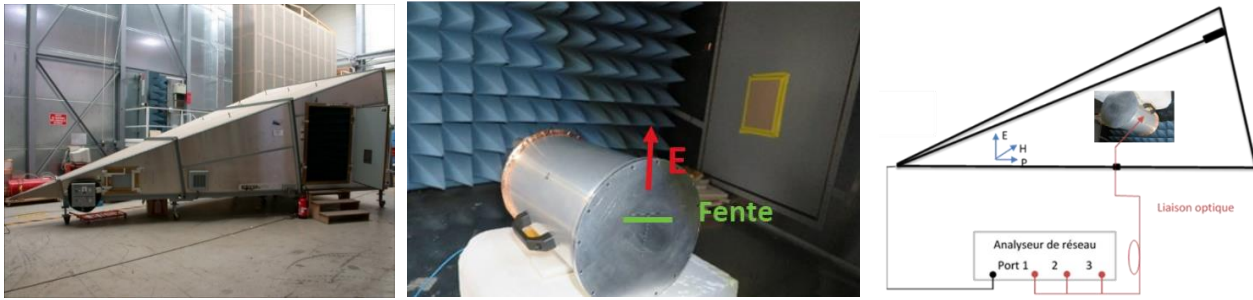


Figure 1 : Moyens d'essai GTEM permettant de mesurer les fonctions de transfert sur la bande 100 MHz – 1 GHz

3. Résultats

Les résultats ci-dessous donnent les fonctions de transfert mesurées pour les sept types de fentes à l'étude :

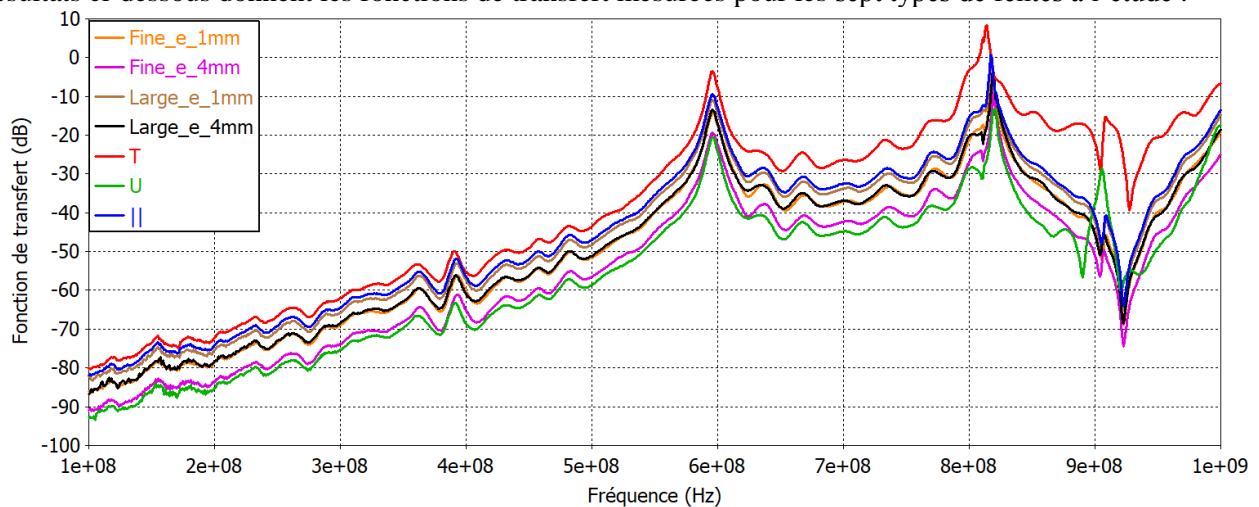


Figure 2 : Résultats des fonctions de transfert entre les sept types de fentes

On observe que la fente T a une fonction de transfert supérieure aux autres topologies à cause de sa longueur ainsi que de ses deux fentes verticales et horizontales. La fente U, quant à elle, est celle ayant la fonction de transfert la plus basse à cause de sa longueur d'éclairement partiel qui est divisée par deux par rapport aux autres fentes. Globalement, les fonctions de transfert se comportent de façon identique entre 100 MHz et 900 MHz avec une fréquence de résonance à 600 MHz et une autre à 820 MHz.

Les comparaisons mesure/simulation (figure 3) montre une reproduction proche en niveau sur la partie asymptotique BF. Celle-ci valide normalement le modèle numérique de fente pour toute la bande de fréquence visée. Les écarts observés sur les modes de résonances et le plateau HF sont liés très probablement à une méconnaissance des caractéristiques électromagnétiques du support en nylon bien que modélisé. Nous avons identifié que l'écart relatif en dB sur le champ par rapport à une fente donnée (ici la fente droite) est un indicateur indépendant du point d'observation et apporte des résultats plus fiables sur une large bande de fréquence incluant la première résonance.

Conclusion

Dans cette contribution, nous avons montré l'intérêt du modèle de fente développé par le laboratoire XLIM. Une simulation FDTD large bande prend 6 minutes sur un nœud de calcul AMD EPYC 9254. Il a montré son efficacité sur des fentes à géométrie complexe. Des perspectives sont attendues sur la comparaison à des mesures en CRBM afin de valider le modèle à des fréquences plus élevées.

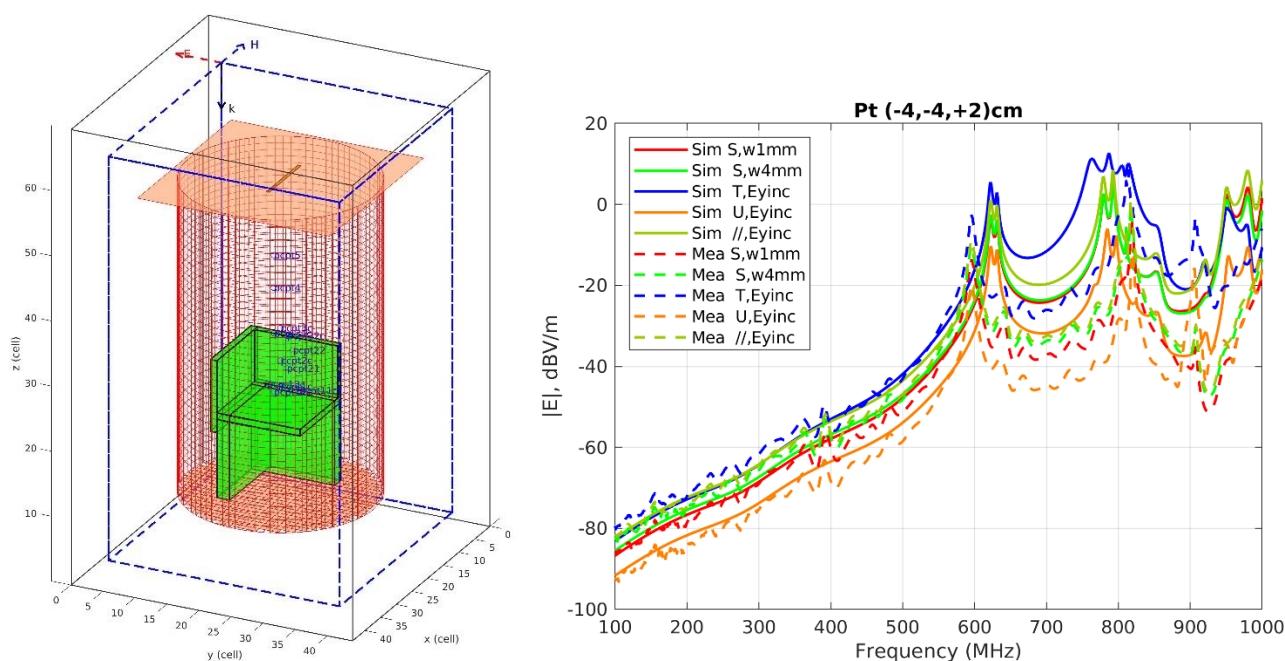


Figure 3 : Modélisation FDTD de la cavité et comparaison simulation mesure, S fente droite, T fente en T, U fente en U, // Fentes parallèles

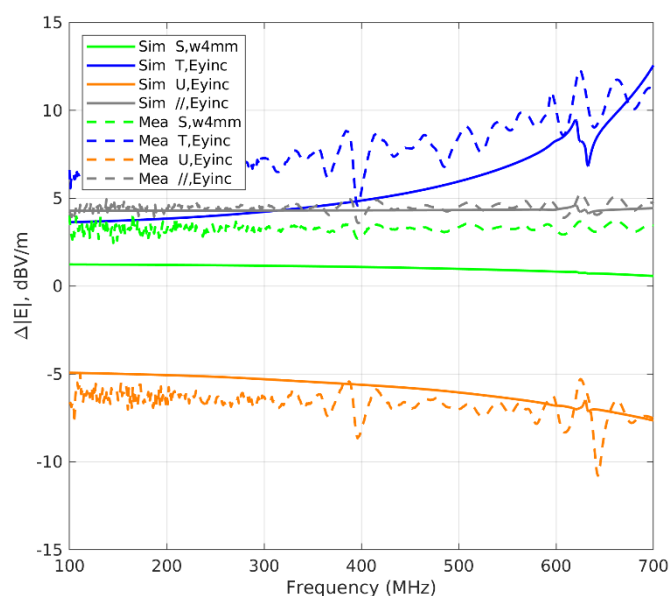


Figure 4 : Écart relatif en dB sur le champ électrique par rapport à la fente droite.

Référence

- [1] J. Gilbert et R. Holland, "Implementation of the thin-slot formalism in the finite difference EMP code TREDII," IEEE Transaction on Nuclear Science, vol. NS-28, n°6, December 1981.
- [2] J.N. Tixier, "Contribution à l'étude de la modélisation de la pénétration des ondes électromagnétiques à travers les fentes et les joints," Thèse de Doctorat de l'Université de Limoges, 1995.
- [3] C.-T. Wu, Y. H. Pang, and R. B. Wu, "An improved formalism for FDTD analysis of thin-slot problems by conformal mapping technique," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 51, no. 9, pp. 2530–2533, Sep. 2003.

MODELISATION HF D'UNE CHAÎNE D'ENTRAÎNEMENT

L. FROUIN¹²³, A. VOLDOIRE¹, P-E. LEVY², P. BRUOT³, M. BENSETTI¹

¹-Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, CNRS, Laboratoire de Génie Electrique et Electronique de Paris (GeePs), 91192 Gif-sur-Yvette, France

²-Université Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay, CNRS, SATIE, 91190 Gif-sur-Yvette, France

³ THALES LAS, 91470 Limours

Résumé

Ce travail propose une méthodologie de modélisation des perturbations électromagnétiques conduites dans une chaîne d'entraînement, composée d'un variateur de fréquence, d'un câble de puissance blindé et d'un moteur synchrone à aimants permanents. L'approche adoptée repose sur des modèles « boîte noire » établis uniquement à partir de mesures expérimentales, permettant de caractériser les impédances internes du variateur, les propriétés fréquentielles du câble et les comportements haute fréquence du moteur. Ces modèles sont intégrés dans l'environnement de simulation LTspice et sont validés expérimentalement jusqu'à 100 MHz. Les résultats mettent en évidence une correspondance satisfaisante entre prédictions et mesures, démontrant la pertinence de la démarche pour anticiper les phénomènes de perturbations dans ce type de systèmes.

1. Introduction

L'alimentation de moteurs électriques par variateurs de fréquence génère des fronts de commutation rapides, riches en composantes harmoniques, qui se propagent le long du câble de puissance et se répercutent jusqu'au moteur [1]. La maîtrise de ces phénomènes nécessite une compréhension fine de la chaîne complète variateur-câble-machine, représentée sur la Figure 1. Or, les approches analytiques classiques reposent sur des hypothèses simplificatrices qui limitent leur validité en large bande [2].

Dans un souci de standardisation de la méthodologie de modélisation, une approche « boîte noire » est envisagée. Elle consiste à extraire, à partir de mesures, des représentations fréquentielles fidèles des différents sous-systèmes, sans avoir recours à une connaissance détaillée de leur structure interne. L'assemblage de ces modèles élémentaires fournit une description de la chaîne complète, exploitable dans un environnement de simulation de type LTspice. Cette approche, validée expérimentalement sur plusieurs configurations, permet la construction d'une méthodologie générique pour l'étude et la prévision des perturbations conduites dans les systèmes électromécaniques embarqués. avec comme perspectives le dimensionnement de filtre CEM. L'état de l'art confirme l'intérêt de cette approche boîte noire, appliquée dans [6] et [7] aux cas de convertisseurs DC/DC. Ce travail est donc organisé en deux parties. La méthodologie de modélisation retenue pour le variateur, le câble et le moteur est présentée dans la première partie. La seconde partie détaille la validation globale du modèle de la chaîne complète.

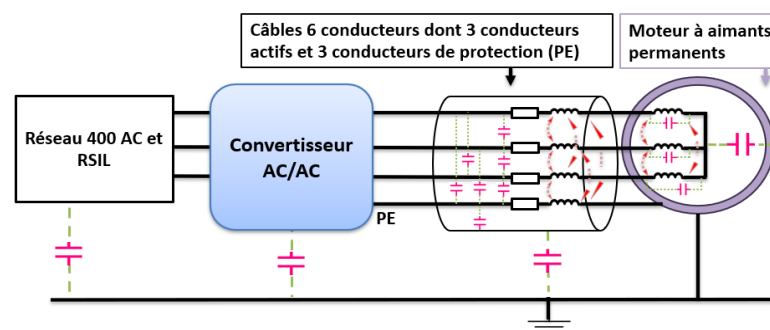


Figure 1 Chaîne d'entraînement considérée

2. Méthodologie de modélisation

Chaque bloc de la chaîne (variateur, câble, moteur) est caractérisé séparément par des mesures d'impédance et de courants. On en déduit des modèles équivalents couvrant la bande requise, qui sont assemblés dans LTspice pour reproduire les sources et la propagation des perturbations jusqu'à 100 MHz. Les équations permettant d'obtenir les valeurs des paramètres de chaque modèle ne seront pas détaillées dans ce résumé.

2.1 Variateur de fréquence

Le variateur est représenté par un modèle boîte noire présenté pour la première fois dans les travaux de [3] comprenant des impédances internes en mode commun (Z_{MC}) et différentiel (Z_{MD}), une source de tension de mode commun et trois sources de courant de mode différentiel. Comme les valeurs des paramètres dépendent du point de fonctionnement choisi, les impédances de charge y sont également représentées. La Figure 2 présente le schéma de ce modèle. Les valeurs de Z_{MC} et Z_{MD} sont déterminées par des mesures d'impédance sur les bornes de sortie convertisseur éteint. Les sources de bruit sont calculées à partir de ces impédances, de l'impédance de charge et des courants mesurés en mode commun et différentiel.

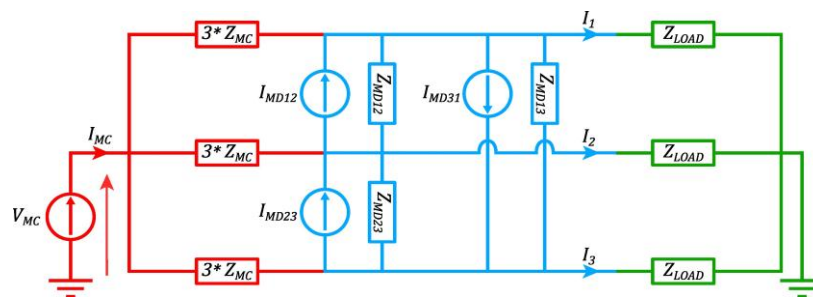


Figure 2 Modèle simplifié du variateur de fréquence [3]

2.1 Câble blindé à 6 conducteurs

Le câble blindé considéré ici est constitué de six conducteurs: 3 phases et 3 pour la terre. Le câble est représenté par un modèle distribué de type ligne de transmission [4]. Chaque cellule élémentaire inclut les résistances, inductances et conductances longitudinales ainsi que les capacités parasites entre conducteurs et vers le blindage. Les paramètres sont dépendants de la fréquence afin de prendre en compte les pertes par effet de peau et dans le diélectrique, ainsi que les couplages capacitifs et inductifs variables selon la proximité des conducteurs. La Figure 3 présente le schéma simplifié d'une cellule du modèle obtenu.

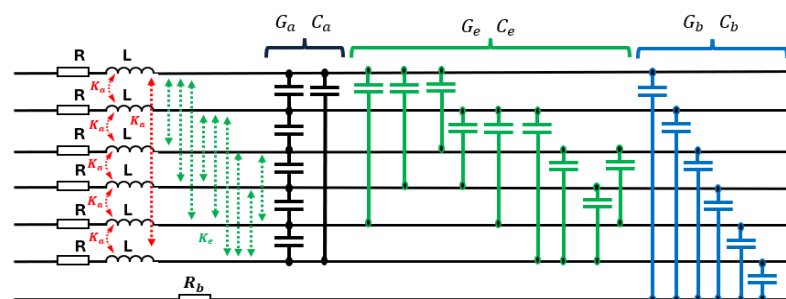


Figure 3 Modèle de cellule élémentaire. Indice **a** : adjacent ; indice **e** : éloigné ; indice **b** : blindage

Pour identifier ces paramètres, un système d'équations est établi à partir des modèles équivalents associés aux différentes configurations de mesure (ouvert, court-circuit, conducteurs groupés ou séparés). Les grandeurs R , L , G et C , fonctions de la fréquence, sont déterminées avec un solveur puis converties en circuits RLC équivalents via optimisation, afin d'obtenir un modèle utilisable dans LTspice. Cette méthode, largement développée dans la littérature et inspirée de l'approche initiale proposée dans [5], nécessite dans notre cas 6 mesures pour extraire l'ensemble des paramètres de la cellule élémentaire.

2.1 Moteur synchrone à aimants permanents

Le moteur synchrone à aimants permanents (PMSM) est modélisé par une structure comportementale basée uniquement sur ses impédances internes. Chaque phase est représentée par un schéma en π , avec deux impédances de mode commun et une de mode différentiel centrale. Deux mesures (MC et MD) suffisent pour relier parties réelles et imaginaires des mesures à celles des impédances du modèle. Cette approche, également inspirée des travaux de [5], est illustrée en Figure 4.

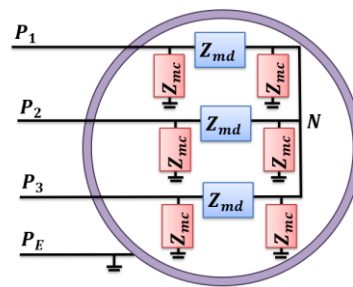


Figure 4 Modèle HF simplifié du moteur

3. Validation de l'approche de modélisation

Les sous-modèles du variateur, du câble et du moteur sont réunis dans un schéma LTspice unique, simulé en temporel pour prendre en compte les non-linéarités liées à la MLI. La validation repose sur la comparaison entre courants de phase simulés et mesurés. La méthodologie de modélisation a été appliquée à deux variateurs : un ABB ACS 880-01 (0,55 → 250 kW) et un Schneider ATV 320 (0,18 → 15 kW), avec 5 mètres de câble et un PMSM de 30kW. Les écarts relatifs sont présentés en Figure 5 pour l'ABB. Cette comparaison, révélant des écarts inférieurs à 5%, permet de valider l'approche de modélisation présentée.

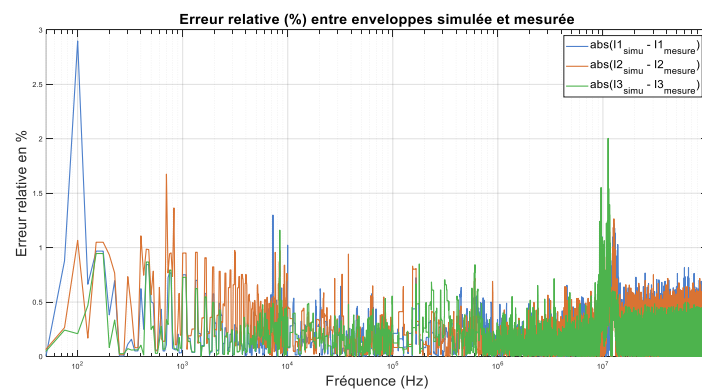


Figure 5 Différence en pourcentage des courants de phases simulés et mesurés pour la chaîne ABB

4. Conclusion

Cet article propose une démarche de modélisation d'une chaîne variateur-câble-moteur à partir d'une approche boîte noire, utilisant uniquement des mesures externes expérimentales. La démarche est validée en comparant des mesures supplémentaires aux résultats de simulation. Elle permet de prédire les perturbations conduites en sortie de variateur et se veut une base pour la conception de filtre CEM en sortie de variateur.

5. Remerciements

Merci à toute l'équipe d'encadrement pour le temps et l'expertise accordée à leur doctorant.

6. Bibliographie

- [1]B. Révol, J. Roudet, J.-L. Schanen and P. Loizelet, "EMI Study of a Three Phase Inverter-Fed Motor Drives," IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 19, No. 6, pp. 1637–1645, November 2004.
- [2]A. R. Roc'h, Behavioural Models for Common Mode EMI Filters, Ph.D. dissertation, University of Twente, Enschede, The Netherlands, 2012.
- [3]M. Amara, Maîtrise des émissions conduites des électroniques de puissance, Ph.D. dissertation, Université de Lille, Lille, France, 2016.
- [4]G. Metzger, J.P. Vabre, «Electronique des Impulsions, Circuit à Constantes réparties», Edition MASSON Cie, 1966.
- [5]M. Moreau, N. Idir, and P. Le Moigne, "Modeling of conducted EMI in adjustable speed drives," IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 51, no. 3, pp. 665–673, Aug. 2009.
- [6]A. Gahfif, « Contribution à l'étude et la réalisation d'un filtre CEM actif hybride destiné à un convertisseur DC-DC à base de transistors GaN », Ph.D. dissertation, Université de Lyon, Lyon, France, 2022.
- [7]M. Ali, « Nouvelles architectures intégrées de filtre CEM hybride », Ph.D. dissertation, Université Grenoble Alpes, Grenoble, France, 2021. Modélisation HF d'une chaîne d'entraînement

Modélisation et évaluation de la distribution des courants « foudre » sur un système aéronautique

D. Cvetkovic^{1,2,3}, S. Lalléchère¹, A. Piat¹, L. Pichon², P-E. Lévy³

¹ : SAFRAN SA, Magny les Hameaux, France

² : GeePs – CentraleSupélec, CNRS, Université Paris Saclay, Sorbonne Université, Gif-sur-Yvette, France

³ : SATIE – ENS Paris-Saclay, CNRS, Université Paris Saclay, Gif-sur-Yvette, France
danica.cvetkovic@safrangroup.com

Résumé

Dans le cadre de nouveaux programmes moteurs comme « RISE », la prise en compte des contraintes de foudre indirecte au niveau du système électrique constitue une étape clé de la conception. Ces contraintes conditionnent en effet le dimensionnement des protections intégrées aux équipements, des tresses de masse reliant boîtiers et structures, ainsi que du blindage des harnais.

1. Introduction

La foudre représente un risque significatif pour la sécurité des avions, pouvant endommager la structure et perturber les systèmes embarqués. La conception doit donc intégrer des dispositifs de protection spécifiques, régie par des normes de certification strictes (DO-160), débutant par le « zoning » des points d'attache et chemins de courant [1]. La modélisation de ces phénomènes reste complexe, en raison de la distribution des courants dans les fixations et des résistances de contact difficiles à caractériser, nécessitant ainsi un grand nombre de simulations. Des outils à la fois précis et efficaces sont nécessaires, et la méthode PEEC (Partial Element Equivalent Circuit)[2] offre une approche prometteuse. Ce travail introduit une nouvelle formulation analytique de type SA-PEEC (Surface-based Analytical PEEC) [3], validée par des essais simplifiés et adaptée à des études plus complexes.

2. Description de la structure étudiée

Le cas test étudié dans ce travail repose sur une maquette surfacique, conçue pour l'injection d'un courant de foudre conforme aux standards. Le dispositif expérimental, illustré en Figure 1b, est constitué de deux plaques de cuivre de 200 mm × 300 mm, reliées par une connexion mobile et présentant une ouverture sur la plaque de droite (Figure 1). L'objectif de cette configuration est de mesurer le courant injecté de type « foudre » via un câble, ainsi que la distribution de ce courant à la surface de la maquette métallique.

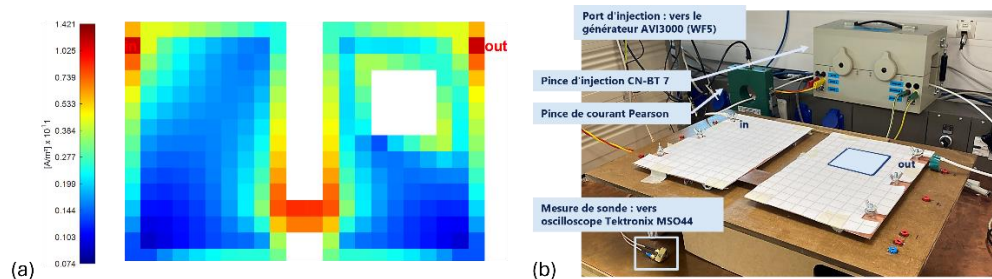


Figure 1. (a) Simulation numérique ; (b) Dispositif expérimental

3. Résultats

La Figure 2 présente les composantes cartésiennes des courants de surface obtenues expérimentalement (en rouge) et numériquement (en bleu, code SA-PEEC), illustrées sous forme de champs de vecteurs (a) et d'amplitudes (b).

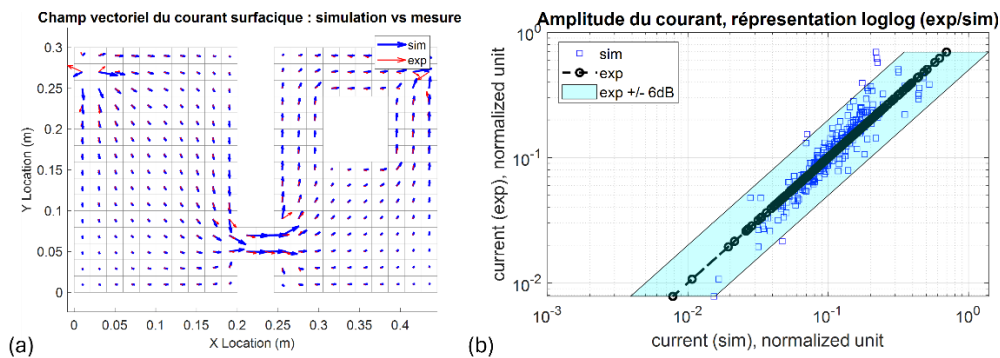


Figure 2. Comparaison mesure et simulation (a) en champ de vecteurs et (b) en amplitudes

Les résultats présentent une bonne concordance, l'ensemble des données ayant été normalisé par rapport au courant injecté défini par la forme d'onde WF5. Les mesures et simulations ont été effectuées dans le domaine temporel. La Figure 2(a) illustre les vecteurs de courant maximum, révélant des similarités marquées sur l'ensemble de la structure.

La Figure 2(b) illustre une forte corrélation entre les résultats expérimentaux et numériques, mise en évidence par la proximité des points par rapport à la diagonale de référence (noire). Une marge de tolérance de ± 6 dB (zone bleu clair) est également considérée : 98 % des points simulés s'y inscrivent, confirmant ainsi la cohérence entre les deux approches.

4. Conclusion

Ces premiers résultats montrent que l'outil numérique proposé offre une approche à la fois flexible et rapide pour analyser les inductances mutuelles partielles ainsi que les chemins de distribution du courant dans des configurations simplifiées. L'étude présentée repose sur une discrétisation grossière de la maquette (maillage de 2×2 cm), qui s'est révélée suffisante pour une validation initiale. Des travaux futurs porteront toutefois sur une analyse paramétrique plus approfondie, utilisant une discrétisation plus fine et l'introduction de volumes élémentaires 3D (de type cylindre).

Afin d'élargir le champ d'application et de confirmer la fiabilité de l'outil, une étude comparative avec une méthode éléments finis (FEM) implémentée dans COMSOL Multiphysics a été effectuée, en commençant par la géométrie de référence (sans ouverture). Cette comparaison, complétée par des mesures expérimentales, a permis de valider la cohérence des résultats numériques et de confirmer la pertinence pratique du modèle.

Les développements futurs viseront à intégrer de nouveaux cas d'étude et à étendre les capacités de la méthode pour des configurations plus représentatives et proches des applications industrielles.

6. Bibliographie

- [1] Y. Fang, « Discussion on Lightning Indirect Effects Test of DO160 », in *2021 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (AP EMC)*, IEEE, 2021, p. 1-4. Consulté le: 6 octobre 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9597012/>
- [2] G. Antonini, A. E. Ruehli, D. Romano, et F. Loreto, « The partial elements equivalent circuit method: The state of the art », *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 65, n° 6, p. 1695-1714, 2023.
- [3] D. Cvetkovic *et al.*, « Modeling lightning surface current plates: S-PEEC analytical formulation and experimental validation », *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, vol. 100, p. 14, 2025.

Etude de la susceptibilité EM d'une chaîne microcontrôleur- servomoteur

Radjaou Boni Salifou¹, Justin Sobas¹, Tristan Dubois¹,

¹ : Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, IMS, UMR 5218, F-33400 Talence, France
 radjaou.boni-salifou@etu.u-bordeaux.fr

Résumé

Alors que les Interférences Electromagnétiques Intentionnelles (IEMI) deviennent une menace croissante, les systèmes électroniques prennent une place de plus en plus grande dans notre quotidien. L'analyse de la susceptibilité EM de ces mêmes systèmes devient alors une priorité. Cette étude présente des mesures de susceptibilité conduite sur une chaîne composée d'un microcontrôleur (μC) et d'un servomoteur. Le signal d'agression est un signal HF sinusoïdal (CW) qui est injecté sur le signal de commande (PWM) entre le servomoteur et le μC . Pour identifier la contribution du μC et du servomoteur dans la susceptibilité globale de la chaîne, trois cas sont considérés : perturbation de la sortie du μC , perturbation de l'entrée du servomoteur et perturbation de la sortie du μC et de l'entrée du servomoteur.

1. Introduction

Des travaux récents [1], [2] illustrent les effets de perturbations électromagnétiques sur un système embarqué composé de différents objets électroniques tels que des capteurs, des modules de communication et plus particulièrement des servomoteurs [2]. En général, un servomoteur est commandé par un signal PWM (Pulse Width Modulation) qui est généré par un microcontrôleur (μC). Des travaux [1][3] ont montré qu'une interférence (rayonnée ou induite) peut modifier le comportement du servomoteur et provoquer la perte de fonction totale. Cependant, ces travaux [1][3] n'expliquent pas l'origine des effets observés. En réalisant des mesures de susceptibilité conduite sur un banc de test maîtrisé, nous présentons des résultats permettant d'identifier la contribution du μC et du servomoteur dans la susceptibilité globale de la chaîne.

2. Banc de test Direct Power Injection DPI

La figure 1 montre le banc de test développé pour les mesures de susceptibilité de cette chaîne. En plus des instruments classiques du banc d'injection DPI (générateur RF, amplificateur, coupleur), des cartes de test spécifiques pour maîtriser l'injection ont été conçues. Les mesures ont été réalisées dans la gamme de fréquences allant de 200 MHz à 1000 MHz et pour des puissances d'interférence absorbées allant de 10 à 25 dBm. Trois configurations d'injections ont été considérées : perturbation de la sortie du μC uniquement, perturbation de l'entrée du servomoteur uniquement et perturbation de la sortie du μC et de l'entrée du servomoteur.

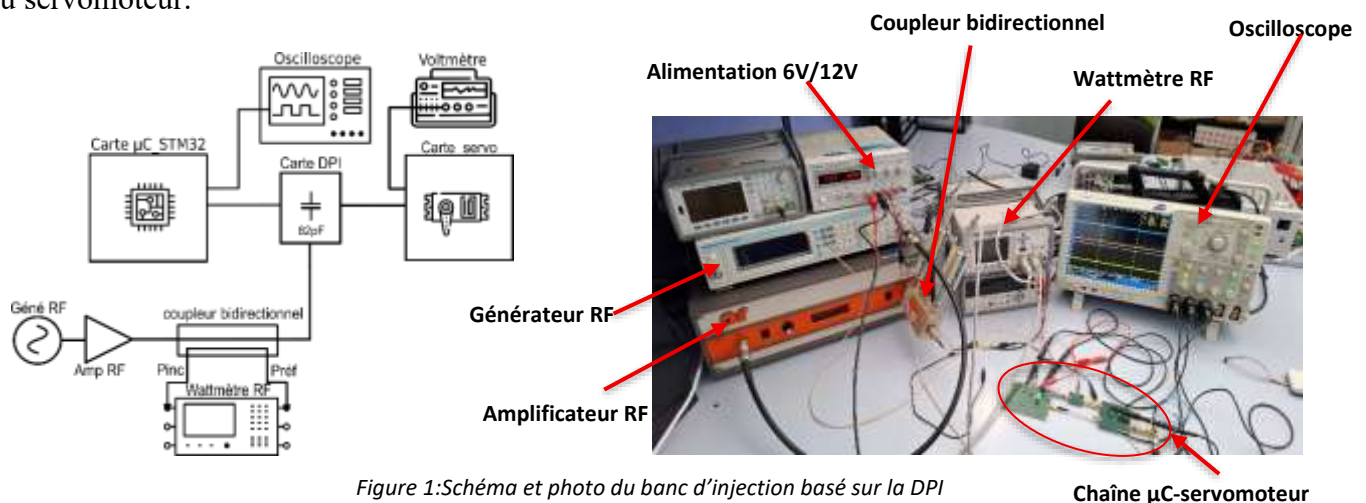


Figure 1: Schéma et photo du banc d'injection basé sur la DPI

3. Résultats et analyses

Les résultats pour les différents cas considérés sont présentés à la figure 2. Cette figure présente l'évolution des niveaux haut (V_h) et bas (V_b) de tension du signal PWM ainsi que la tension du potentiomètre qui dépend de la position du servomoteur.

Dans les trois cas nous observons que l'injection de la perturbation modifie les niveaux de tension du signal PWM.

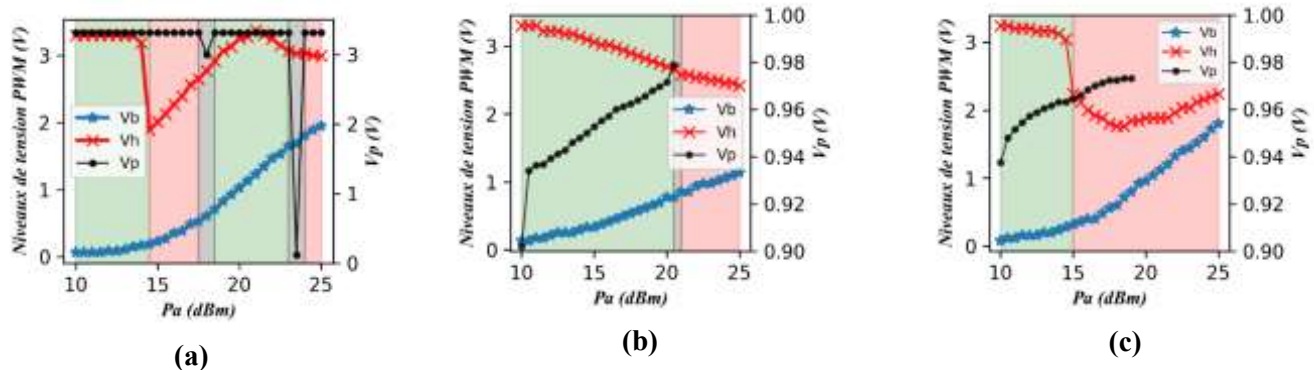


Figure 2: Evolution des niveaux de tension haut et bas du PWM et tension du moteur V_p lors de la perturbation (a) de la sortie du μC (b) de l'entrée du servomoteur (c) perturbation de la sortie du μC et de l'entrée du servomoteur

Les effets observés sur le servomoteur sont la perte de régulation et la vibration du servomoteur. Ces effets sont identifiés sur la figure 2 par les zones en rouge pour la perte de la régulation, et en grise pour la vibration du servomoteur. Dans le premier cas (figure 2.a), lors de l'injection sur la sortie du μC , on observe uniquement les niveaux du signal PWM changer. En fonction du niveau de tension, le servomoteur vibre ou n'est plus régulé. En revanche, nous n'observons pas d'effet sur la tension du potentiomètre. Lors de l'injection sur l'entrée du servomoteur (figure 2.b), en plus du changement des niveaux de tension du signal PWM, la tension du potentiomètre change indiquant un déplacement du servomoteur. Une analyse de l'architecture interne du servomoteur a permis de comprendre que le signal d'interférence perturbait le circuit intégré responsable de la commande du moteur intégré au servomoteur (figure 2.b). Ce circuit compare notamment la tension V_p issue du potentiomètre et la commande PWM puis génère les tensions de commande du moteur à sa sortie. Par conséquent la variation des niveaux logiques du signal PWM, a pour effet de modifier la tension de sortie générée par le circuit intégré et donc modifier V_p , comme illustré sur les figures 2 (b et c). Finalement, lorsque la perturbation est injectée sur la sortie du μC et l'entrée du servomoteur (figure 2.c), on constate que les niveaux de tension du signal PWM évoluent comme sur la figure 2.a. De plus, on retrouve que la tension du potentiomètre change comme sur la figure 2.b. La susceptibilité de la chaîne correspond donc à un mélange de la susceptibilité du μC et du servomoteur.

4. Conclusion

Dans cette contribution, nous avons montré qu'un signal d'interférence couplé sur le signal de commande PWM d'un servomoteur entraîne une modification des niveaux logiques haut et bas dû à la susceptibilité de la sortie d'un microcontrôleur et à celui d'un des circuits intégrés du servomoteur. De plus nous avons montré que les conséquences de cette perturbation sont la perte de régulation et une dégradation du fonctionnement du servomoteur et une modification de la tension V_p du potentiomètre traduisant à un changement de position du servomoteur.

6. Bibliographie

- [1] Selvaraj Jayaprakash et al, "Electromagnetic Induction Attacks Against Embbed Systems", *ASIACCS*, p. 4, 2018.
- [2] Antoine Duget et al, "Etude préliminaire de l'effet des IEMI sur un système connecté", 2023.
- [3] Valentin Houchouas et al, "Immunity Assessment of a servomotor Exposed to an intentional Train of RF Pulses" *EMC EUROPE*, 2017.

Caractérisations et simulations électrothermiques des émissions de mode commun et de champ rayonné des circuits d'électronique de puissance sur PCB.

J.-M. Dienot^{1,2}, N. Artaud^{1,3}, R. Ruscassi¹, V. Gavrilenko¹

¹ : Laboratoire SIAME – Fédération IPRA, EA4581/E2S/UPPA, 64000 Pau, France

² : Université de Toulouse, Laboratoire Labceem, 65000 Tarbes, France

³ ONERA/DEMR, 31000 Toulouse, France.

Résumé

Nous présentons un état synthétique de travaux menés autour de la problématique des cas réalistes et multiphysiques des émissions CEM des composants et circuits de puissance. Des topologies et prototypes canoniques de circuit imprimé de puissance (PPCB) ont été développés afin de comparer les différents cas d'émissions conduites et rayonnées suivant les technologies de semiconducteur et de routages actuels. Des caractérisations en mode conduit pour la mesure des courants de mode commun, en mode rayonné pour la mesure des champs E et H, nous ont amenés à proposer des procédures de modélisations et de simulations, et des résultats sur les effets et dispersions CEM lorsque les PPCB sont soumis à de fortes températures externes. Ceci conduit à discuter des nouveaux cas de couplages EM dans les structures électroniques embarquées soumis à des environnements et contraintes multiphysiques.

1. Introduction

Les semiconducteurs et composants de puissance évoluent constamment depuis plusieurs années pour convertir et distribuer l'énergie électrique avec de forts rendements et efficacité énergétiques. Les progrès sont très visibles sur les performances dv/dt et di/dt , avec de nouveaux matériaux et topologies de transistors de puissance. Mais les conséquences et inconvénients majeurs sont la montée en fréquence et en amplitude des perturbations et émissions EM, à la fois en mode conduit et rayonné proche. De plus, ces composants et leurs modules applicatifs sont utilisés dans des dispositifs mécatroniques et embarqués, soumis aux conditions réelles de température et de contraintes mécaniques liées à leurs missions. Nous présentons les études menées pour comprendre et appréhender l'impact de ces contributions physiques externes sur les le comportement EM et les réponses CEM des circuits de puissance. Elle nous permet de proposer des simulations mixtes électriques-électromagnétique-thermiques pour discuter des impacts CEM de la température sur les modules électroniques.

2. Le design du démonstrateur PPCB (Power Printed Circuit Board)

Nous avons conçu des circuits imprimés type permettant d'effectuer des mesures CEM en conduit et en rayonné dans les mêmes conditions pour différentes familles et technologies de composants. Le design et le routage du Power PCB a quelques règles spécifiques pour l'évaluation CEM : la couche supérieure est classiquement en cuivre $35\mu\text{m}$ ou $70\mu\text{m}$. Le support diélectrique peut être en époxy -FR4 ou en céramique. La dernière couche (Plan de masse) est en Aluminium épais (1mm) pour aider à la dissipation de chaleur. La taille du PPCB est unique : $10,3\text{cm} \times 10,3\text{cm}$ pour effectuer des mesures en cellule TEM (de Crawford) qui dispose de cette ouverture. Le composant à tester est placé sous le plan de masse, les autres composants et connecteurs sur la face supérieure.

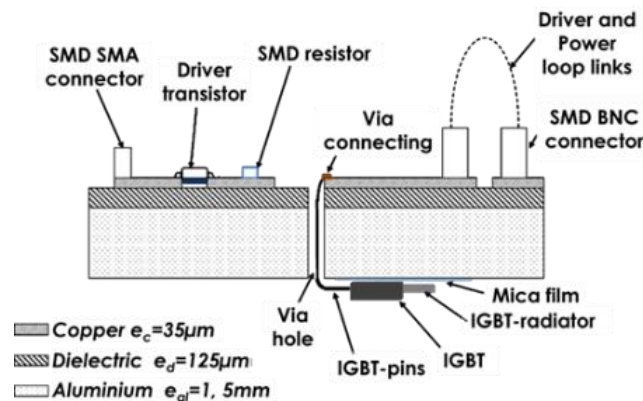


Fig. 1. Vue transverse du Prototyp-démonstrateur PTR-6

3. Modèles équivalents des dispositifs d'évaluation des émissions du démonstrateur

La technique de modélisation pour développer des modèles électriques équivalents à partir de comportements électromagnétiques et thermiques est basée sur les concepts de la méthode TLM et des Eléments Partiels. Avec des codes numériques accessibles (Eléments Finis), La méthode permet de calculer des impédances complexes des parties 3D constitutives du circuit pour les assembler en topologies de cellules RLCG distribuées. A partir d'une analyse et identification fine des chemins de courant de circuit du démonstrateur PPCB, nous pouvons proposer différentes configurations de modélisations pour reproduire en simulation le mode conduit et le mode rayonné du circuit et de son environnement. La comparaison des courants de mode commun mesurés et simulés sur un des prototypes PPCB permet de valider cette approche.

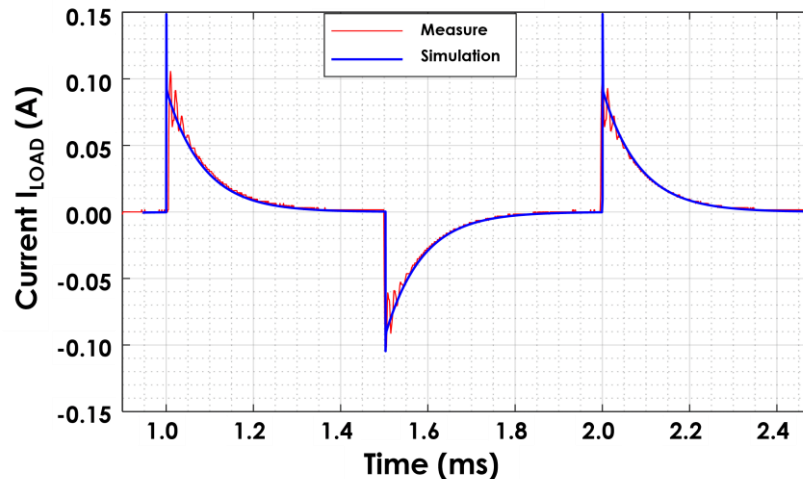


Fig. 2. Comparaison des formes d'ondes du courant de sortie mesurées et simulées

4. Résultats des émissions CEM sous contraintes thermiques

Pour estimer les impacts d'une agression thermique externe sur le comportement CEM de nos modules, nous avons modifié les bancs de mesures en mode conduit et en mode champ proche par l'insertion d'un système chauffant par induction, pouvant atteindre 300°C. Les résultats sont visibles en mode conduit, mais peu prononcés sur les courbes temporelles des commutations et des perturbations de mode commun. Les résultats sont plus pertinents sur des mesures de champ H effectuées au-dessus de différents points de la carte : les spectres présentent de fortes dispersions avec la température sur chaque zone individuelle testée, mais aussi entre elles ou les impacts à chaque palier de température semblent très différents.

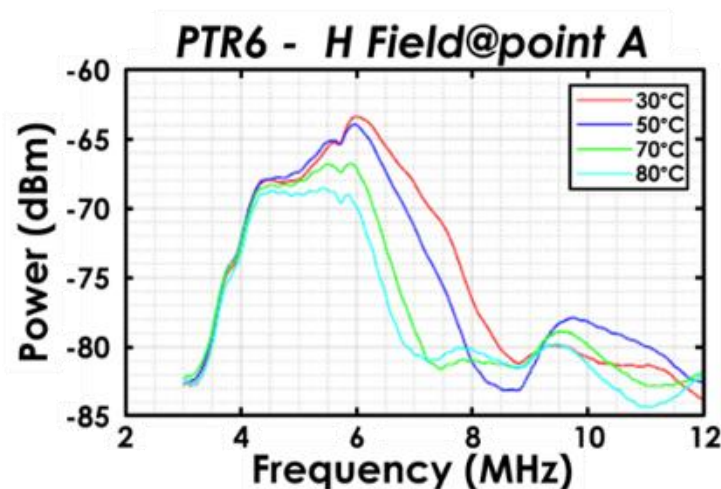


Fig. 3. Spectre du champ magnétique H mesurée pour différentes températures

5. Conclusion

Une procédure complète et des campagnes de caractérisation CEM et thermique ont été développées autour des circuits et composants de puissance. Nous avons pu valider des schémas de simulation électrique réaliste prenant en compte tous les aspects haute fréquence et multiphysique de circuits de puissance canoniques. La double caractérisation thermique-électromagnétique de différents modes d'émission conduit et rayonné a montré le fort impact des conditions de température réelle sur les fréquences et les niveaux des réponses. L'étape suivante, en cours d'études, consiste à intégrer sous forme de modélisation électrique les variations d'impédance et de source soumis à des températures hors ambient.

Références

- [1] F. A. Kharanaq, A. Emadi, and B. Bilgin, "Modeling of Conducted Emissions for EMI Analysis of Power Converters: State-of-the-Art Review," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 189313–189325, Oct. 2020. doi: 10.1109/ACCESS.2020.3031693.
- [2] J.M. Larbaig, J.M. Dienot, R. Ruscassie, I. Ramos, "The Challenges for Electromagnetic Diagnosis and Control of Power Devices using Wide-Band Gap Semi-conductors," in *Proc. Of the 7th IEEE International Workshop on Metrology for Aerospace*, pp. 205-210, Pisa, Italy, 22-24, June 2020. doi: 10.1109/MetroAeroSpace48742.2020.9160314, MAS 2020,
- [3] E. Hoene, A. Lissner, S. Weber, S. Guttowski, W. John, and H. Reichl, "Simulating electromagnetic interactions in high power density converters," in *Proc. of the 36th IEEE Pow. Elect. Spec. Conf. (PESC2005)*, pp. 1665-1670, Dresden, Germany, June 16, 2005. ISBN:0-7803-9033-4
- [4] D. Romano, L. Di Angelo, I. Kovacevic-Badstübner, U. Grossner, M. Parise, and G. Antonini, "Efficient Partial Elements Computation for the Non-Orthogonal PEEC Method Including Conductive, Dielectrics, and Magnetic Materials," *IEEE Trans. on Magnet.*, vol. 58, no. 8, Aug. 2022. doi : 10.1109/TMAG.2022.3184501
- [5] B. Khvitia, A. Gheonjian, Z. Kutchadze, and R. Jobava, "A SPICE Model for IGBTs and Power MOSFETs Focusing on EMI/EMC in High-Voltage Systems," *Electronics*, vol. 10, no. 22, p. 2822, 2021. doi: 10.3390/electronics10222822
- [6] N. Artaud, I. Junqua, J-M. Dienot, L. Guibert, S. Boujouj, "Thevenin black box model to characterize conducted electromagnetic interference of DC/AC converters for aerospace applications," in *Proc. of EMC Europe 2024*, pp. 356-351, Bruges, Belgium, Sept. 2–5, 2024.
- [7] H. Boulzazen, F. Fouquet, A. Reineix, "Experimental study and development of an "EMC-thermal stress" test bench used in Mode Stirred Reverberation Chamber "MSRC"," in *Proc. of 2009 International Workshop EMC'COMPO*, Toulouse, France, November 17-19, 2009.

Modélisation des interactions électromagnétiques sur les architectures électriques de puissance

N. Artaud^{1, 2}, I. Junqua¹, J.-M. Dienot^{2, 3}, R. Ruscassié².

¹ ONERA/DEMR, 31000 Toulouse, France.

² : Laboratoire SIAME – Fédération IPRA, EA4581/E2S /UPPA, 64000 Pau, France

³ : Université de Toulouse, Laboratoire Labceem, 65000 Tarbes, France

noan.artaud@onera.fr

Résumé

L'utilisation de l'énergie électrique pour propulser les avions ouvre la voie à de nouvelles configurations, en particulier la propulsion distribuée, qui offre une efficacité Aero-propulsive accrue ainsi que de nouvelles capacités de reconfiguration pour la gestion de l'énergie et de la sécurité. Dans ce contexte la modélisation peut aider à anticiper d'éventuels problèmes de compatibilité électromagnétique et à évaluer des solutions d'intégration des équipements de puissance et des câblages dans la structure, assurant ainsi fiabilité et sécurité; cette contribution présente le développement de méthodologies de modélisation des interactions électromagnétiques adaptées pour évaluer les contraintes de compatibilité électromagnétique (CEM), en termes d'émissions conduites et rayonnées sur ces nouvelles architectures de puissance

1. Introduction

Dans un avenir proche, la propulsion électrique distribuée, reposant sur plusieurs moteurs le long de la voilure, constitue une solution prometteuse à la décarbonation de l'aviation. Alimenter ces moteurs nécessite d'accroître la puissance embarquée et son efficacité de rendement; mais cette hausse de puissance, et la conversion d'énergie assurée par les convertisseurs actuels à très fort dV/dt et dI/dt , soulèvent de nouvelles problématiques, notamment d'interférences électromagnétiques. Nous présentons une méthode de modélisation comportementale, basée sur des données expérimentales, pour évaluer de manière réaliste les interférences perturbations électromagnétiques générées par un convertisseur, ceci dans un contexte aérospatial.

2. Description du modèle de Thevenin "boîte noire".

Un réseau de puissance (Fig. 1) assure l'acheminement, la conversion et la régulation de l'énergie depuis les alimentations (a) aux charges (moteurs (b) et hélice) (c) via des convertisseurs (d), l'ensemble étant connecté par des faisceaux de câbles (e).

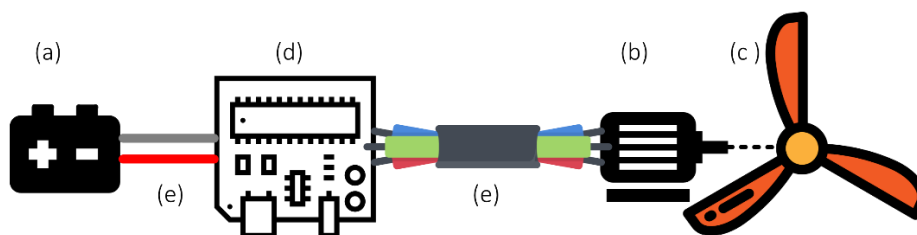


Figure 1. Schéma d'une chaîne de puissance

Dans cette chaîne, le convertisseur est la principale source des interférences électromagnétiques. Ainsi, la modélisation CEM dite boîte noire du convertisseur par un générateur de Thévenin permet d'aider à la maîtrise des émissions conduites par simulation prédictive. Cette modélisation comportementale est basée sur des caractérisations rigoureuses, à l'aide des paramètres $[S]$, des impédances de Thévenin et des éléments

de la chaîne de puissance. Puis, les vecteur tension du modèle Thévenin sont extraits à l'aide d'une série de mesures, à l'analyseur de spectre, des courants induits sur chacune des entrées/sorties du convertisseur pour un point de fonctionnement. Finalement, l'information manquante sur les différentes valeurs de phase entre courants des modèles de Thevenin sont évaluées via des mesures additionnelles de courants de mode commun et un processus d'optimisation.

3. Application et résultats

Nous avons appliqué cette procédure de modélisation au démonstrateur de banc Brushless 5kW : 2 moteurs Brushless connectés par une courroie de transmission, une alimentation continue de 72V, 2 réseaux de stabilisation d'impédance des lignes (RSIL), un convertisseur DC/AC. L'implémentation du modèle est réalisé à partir des caractérisations fréquentielles dans diverses configurations décrites précédemment. Notre méthode apporte une précision importante sur les paramètres de phases des courants d'entrée et de sortie, par un processus d'optimisation propre et lié à la modélisation CRIPTE de l'Onera. Nous voyons de très bonnes corrélations entre les mesures et les simulations des spectres de courants de mode commun circulant dans la chaîne de puissance. Nous avons pu tester également, en simulation, l'effet d'insertion de filtres de mode commun entre les RSILs et le convertisseur.

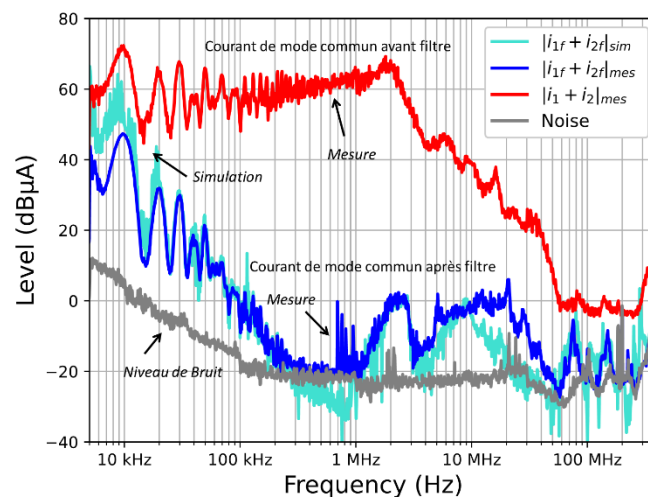


Figure2. Comparaison des courant de mode commun mesurés et simulés

4. Conclusion

Nous avons démontré le développement et la pertinence de modèles comportementaux électriques et numériques les plus représentatifs des contraintes CEM dédiés à des architectures de puissance. La bonne représentativité des résultats de simulations obtenus nous permet d'envisager l'intégration de ces modèles dans des outils de simulation de l'ingénierie électromagnétique, et de pouvoir estimer les couplages conduits et rayonnés des chaînes de puissance dédiées à l'Avionique.

5. Bibliographie

- [1] N. Artaud, J.-M. Dienot, I. Junqua, L. Guibert, and S. Boujouj, "Thevenin black box model to characterize conducted electromagnetic interference of DC/AC converters for aerospace applications", in 2024 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe, Sept. 2024, pp. 356–361.
- [2] N. Artaud, I. Junqua, J.-M. Dienot, and R. Ruscassié, "Unterminated Thevenin Black Box Modeling of a DC/3AC Converter for Aerospace Applications", in 2025 ESA Workshop on Aerospace EMC (Aerospace EMC), May 2025, pp. 1–6.

Affiche GT6

Modélisation du transport de la lumière dans des milieux très hétérogènes : application aux vitraux contemporains de Pierre Soulages

S. Milcent¹, J. Hu¹, M. Hébert², J.-J. Greffet³, K. Vynck¹

¹ : Université Claude Bernard Lyon 1, CNRS, Institut Lumière Matière, Villeurbanne, France

² : Université Jean Monnet, Institut d'Optique Graduate School, CNRS, Laboratoire Hubert Curien, Saint-Etienne, France

³ : Université Paris-Saclay, Institut d'Optique Graduate School, CNRS, Laboratoire Charles Fabry, Palaiseau, France
simon.milcent@univ-lyon1.fr

Résumé

Les vitraux contemporains de Pierre Soulages, installés dans l'abbatiale de Conques, sont des matériaux hétérogènes, très diffusants, et pourtant très lumineux en transmission. Cette étude vise à élucider, par la simulation physique du transport de la lumière, les mécanismes physiques à l'origine de ces propriétés optiques étonnantes. Nous présentons un code numérique basé sur la méthode Monte Carlo développé pour prédire le transport lumineux dans les vitraux de Soulages. Nos prédictions pourront être comparées à des mesures expérimentales réalisées sur des échantillons de vitraux.

1. Introduction

La physique des ondes dans les milieux complexes est un sujet très actif dans plusieurs communautés, allant de la sismologie, à l'imagerie acoustique et optique du vivant, en passant par l'optique atmosphérique. La compréhension du transport lumineux dans des milieux tels que des suspensions de particules distribuées de manière aléatoire et uniforme (nuages, brouillards) est aujourd'hui très avancée [1,2]. Les vitraux de l'abbatiale de Conques [Fig. 1(a)] [3], créés par Pierre Soulages (1919-2022), se démarquent des milieux désordonnés habituels du fait de leurs propriétés optiques étonnantes : ils sont à la fois diffusants et lumineux, alors que les milieux turbides diffusants sont généralement sombres en transmission. Cette particularité pourrait être due aux fortes hétérogénéités des vitraux, constitués de grains de verre de tailles et formes très variables [Fig. 1(b)].

Dans cette étude, nous cherchons à comprendre comment le transport de la lumière est impactée par les fortes hétérogénéités d'un matériau, avec pour objectif de donner un point de vue physique à l'œuvre de Soulages. Pour se faire, nous développons un modèle numérique basé sur des simulations Monte Carlo dans des milieux générés numériquement à l'aide de diagrammes de Voronoï. Ce modèle numérique nous permet de prédire certaines quantités, telles que la transmittance, la fonction d'étalement du point, ou encore le cône de rétrodiffusion cohérente, qui pourront prochainement être comparées à des mesures expérimentales.



Figure 1. (a) Photographie des vitraux de l'abbatiale de Conques (Crédit : <https://www.flickr.com/photos/cpakmoi/13140960304>, 26/09/25 15h00). (b) Photographie d'un échantillon de vitraux mis à disposition par le Musée Soulages de Rodez, montrant les hétérogénéités dans le volume.

2. Résultats

La méthodologie consiste dans un premier temps à générer numériquement une structure représentative des vitraux de Soulages. Nous générons une distribution aléatoire de points dans un volume puis la structure de Voronoi correspondante avec des conditions de bords périodiques pour simuler une structure virtuellement infinie. Le résultat, tel qu'illustré en Fig. 2(a), est une structure hétérogène constituée de cellules de forme variables et d'interfaces.

Dans un second temps, nous modélisons le transport lumineux dans un milieu d'épaisseur finie par une série de marches aléatoires – les marcheurs aléatoires se déplacent dans le diagramme, ne subissant aucune interaction dans les cellules et subissant des événements de diffusion en rencontrant des interfaces. Ces événements de diffusion sont régis par des principes physiques. Une trajectoire se termine lorsque le marcheur aléatoire sort du milieu, en réflexion ou en transmission. La Fig. 2(a) présente un exemple de trajectoire aléatoire dans un modèle de vitraux. La distribution spatiale de l'intensité lumineuse en sortie est finalement obtenue en construisant un histogramme des positions des marcheurs aléatoires en sortie.

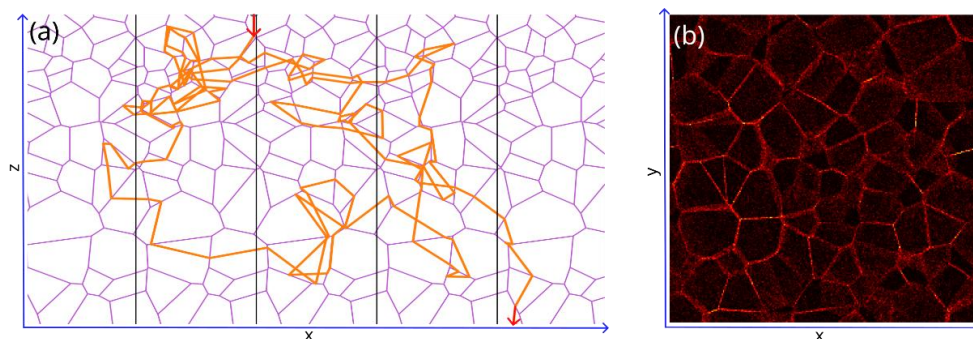


Figure 2. (a) Visualisation de la trajectoire (en orange) d'un marcheur aléatoire dans un modèle de vitrail 2D, construit à partir d'un diagramme de Voronoi périodisé. (b) Prédiction Monte Carlo de la distribution spatiale de l'intensité lumineuse en transmission d'un modèle de vitrail 3D.

La Fig. 2(b) montre une prédiction de distribution spatiale d'intensité transmise à travers un modèle de vitrail pour une onde plane incidente, obtenue par la simulation de 10^5 marches aléatoires. Contrairement à ce que l'on observerait dans le cas d'un milieu statistiquement homogène, à savoir une distribution uniforme d'intensité transmise, l'hétérogénéité induit des fluctuations fortes de l'intensité transmise, caractéristiques de la microstructure sous-jacente.

3. Perspectives

Dans la suite, nous prévoyons d'étudier numériquement comment les paramètres de la structure hétérogène affectent certaines propriétés optiques, puis de comparer nos prédictions à des mesures expérimentales réalisées sur des échantillons de vitraux de Soulages. Une autre ligne de recherche sera de développer des modèles théoriques pour le transfert radiatif dans des milieux très hétérogènes.

4. Remerciements

Les auteurs remercient le Musée Soulages (Rodez) pour la mise à disposition des échantillons de vitraux, ainsi que le consortium de la « Chaire Soulages et la Lumière » pour les discussions fructueuses. SM remercie Dylan Bissuel (iLM, Lyon) pour son aide dans l'optimisation du code Monte Carlo.

5. Bibliographie

- [1] Vynck, K *et al.*, Light in correlated disordered media, *Rev. Mod. Phys.*, vol. **95**, pp. 045003, 2023.
- [2] Carminati R and Schotland JC, *Principles of Scattering and Transport of Light*, Cambridge University Press, 2021.
- [3] Soulages, P. *Verre, carton des vitraux de Conques*, Paris : Actes Sud et Musée Fabre, 2010.

Optimized Reconstruction Framework in Fluorescence Diffuse Optical Tomography Using Radiative Transfer Equation

Pascal Nguyen^{1,2}, Martin Rodriguez-Vega¹, Julien Wojak¹, Paul Dorval², Rémi André¹, Maxime Henry³, Véronique Josserand³,
 Xavier Le Guével³, and Anabela Da Silva¹

¹ Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Med, Institut Fresnel, Marseille, France

² Kaer Labs, Nantes, France

³ Institute for Advanced Biosciences, University Grenoble Alpes, INSERM U1209, CNRS UMR 5309, 38000 Grenoble, France

pascal.nguyen@fresnel.fr

Summary

We present a fluorescence diffuse optical tomography reconstruction framework based on the radiative transfer equation. Validated against the diffusion approximation framework, it proves to be a viable alternative for second near-infrared window tomography reconstruction.

1. Introduction

Fluorescence Diffuse Optical Tomography (FDOT) is a non-invasive imaging technique that uses near-infrared wavelengths to visualize deep tissues marked with fluorescent probes [1] and is particularly useful in pre-clinical murine models [2]. The second near-infrared window NIR II (900 nm-1700 nm), also known as shortwave infrared (SWIR), offers higher spatial resolution with reduced scattering and higher absorption [3], but the commonly used Diffusion Approximation (DA) [4] is invalid in this range. Instead, the more accurate but more complex Radiative Transfer Equation (RTE) is considered. This work presents a reconstruction framework using a Monte Carlo-based RTE solver (Monte Carlo eXtreme, MCX) [5] to compute the forward model. An inversion process based on Non-negative Matrix Factorization (NMF) [6] is considered, which removes the need for hyperparameter tuning and enforces the non-negativity constraint intrinsic to FDOT. The forward and inversion processes are GPU- accelerated.

2. Methodology

2.1 Generation of synthetic data

We consider a continuous-wave FDOT acquisition that scans the sample in transillumination mode at discrete points [7]. At each point, the light distribution in transmission at both excitation and fluorescence wavelengths is measured on the surface of the sample. To simulate the FDOT data, these two following steps are carried out using MCX for each step using a GPU :

- Excitation : Compute ϕ_{ex} (the excitation fluence) using δ_{source} as the source term. δ_{source} is a Dirac delta function representing the source point.
- Fluorescence : Compute ϕ_{fluo} (the fluorescence fluence) using $\phi_{ex} 1_F X$ as the source term. 1_F is the fluorophore indicator function and X is the fluorescence yield.

2.2 Inverse problem

The inverse problem is linearized using the normalized Born approximation as [7]:

$$y = \frac{U_{fluo}}{U_{ex}} = \frac{\sum_m G_{sm}^{ex} G_{md}^{fluo} X}{G_{sm}^{ex}} = Ax$$

where U_{ex} and U_{fluo} are the data associated with excitation and fluorescence, G_{ex} and G_{fluo} are Green's functions for excitation and fluorescence wavelengths, s is the index of the source, d is the index of the detector and m is the index of the voxel of the reconstruction mesh. Due to the ill-conditioned nature of the inverse problem, the fluorescence images are filtered using Otsu thresholding [8] to retain only high SNR pixels.

3. Results

The synthetic sample mimics a 1 mm fluorescent capillary tube embedded in an intralipid block (40 mm x 40 mm x 15 mm) placed on a plexiglass plate, with a highly absorbing sphere above it, as shown in Figure 1. Optical properties were chosen to be similar to those of a biological tissue at excitation $\lambda_x \sim 800$ nm (intralipid block and capillary tube : $\mu_a = 0.01 \text{ mm}^{-1}$, $\mu_s = 10 \text{ mm}^{-1}$ / absorbing sphere: $\mu_a = 0.1 \text{ mm}^{-1}$, $\mu_s = 10 \text{ mm}^{-1}$) and fluorescence $\lambda_m \sim 1000$ nm (intralipid block and capillary tube : $\mu_a = 0.1 \text{ mm}^{-1}$, $\mu_s = 5 \text{ mm}^{-1}$ /

absorbing sphere: $\mu_a = 0.5 \text{ mm}^{-1}$, $\mu_s = 5 \text{ mm}^{-1}$) [3]. The fluorescence yield was set to $X = 0.01$ for the simulation.

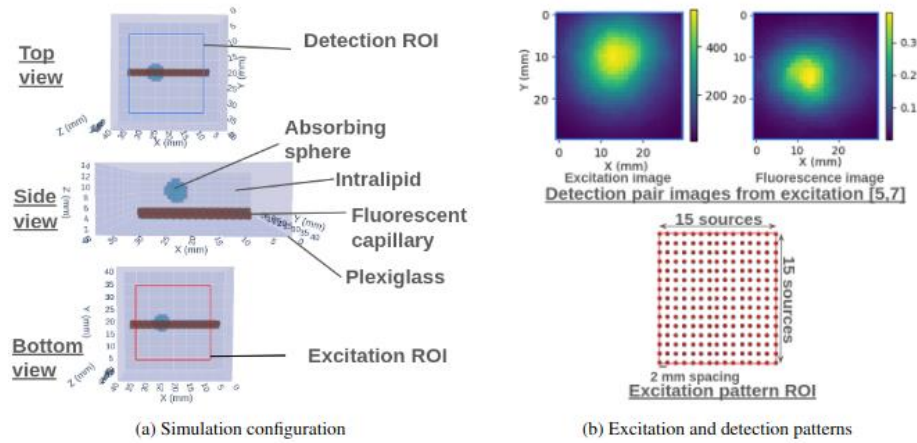


Figure 1: Simulation framework

A is constructed using either RTE (MCX [5]) or DA (built in-house DA solver, but alternatives exist like NIRFAST [9]). Both RTE and DA-based reconstructions yield similar results in NMSE, MAD and SSIM (see Figure. 2). While DA offers faster computing, the speed gain is not overwhelming, making RTE-based reconstruction a viable alternative to DA-based reconstruction.

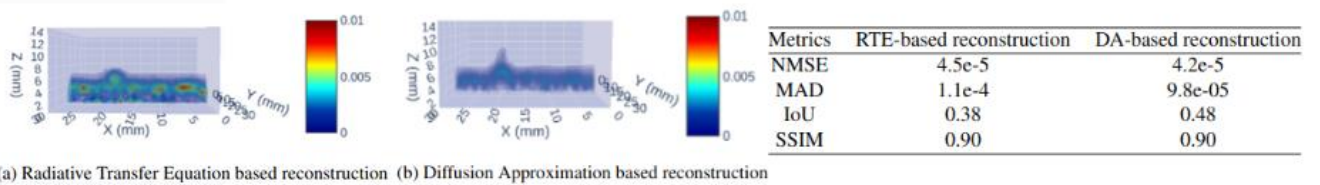


Figure 2: 3D visualization of RTE-based and DA-based reconstruction with metrics

4. Conclusion

We have developed a reconstruction framework using a RTE solver to construct the sensitivity matrix. The RTE-based reconstruction is relevant compared to the DA-based reconstruction in terms of speed and accuracy, making it a viable alternative for reconstruction farther in the NIR II range where DA is not valid. Future work will include complex geometries closer to murine model with fluorescence wavelengths farther in the NIR II range.

5. Acknowledgements

This work received support from the french government under the France 2030 investment plan, as part of the Initiative d'Excellence d'Aix-Marseille Université – A*MIDEX (AMX-20-TRA-053) and was partially funded by France Life Imaging (grant ANR-11-INBS-0006) and ANR-24-CE19-2073-01.

6. References

1. R. Weissleder and V. Ntziachristos, "Shedding light onto live molecular targets," Nat. Med. 9, 123–128 (2003).
2. V. Ntziachristos, "Visualization of antitumor treatment by means of fluorescence molecular tomography with an annexin v-cy5.5 conjugate," Proc. National Acad. Sci. 101, 12294–12299 (2004).
3. S. L. Jacques, "Optical properties of biological tissues: a review," Phys. Med. Biol. 58, R37–R61 (2013).
4. A. Ishimaru, Wave propagation and scattering in random media, vol. Vol. I (Academic Press, 1978).
5. Q. Fang and D. A. Boas, "Monte carlo simulation of photon migration in 3d turbid media accelerated by graphics processing units," Opt. Express 17, 20178–20190 (2009).
6. D. Lee and H. S. Seung, "Algorithms for non-negative matrix factorization," in Advances in Neural Information Processing Systems, vol. 13 T. Leen, T. Dietterich, and V. Tresp, eds. (MIT Press, 2000).
7. L. Hervé, A. Koenig, A. D. Silva, M. Berger, J. Boutet, J. M. Dinten, P. Peltié, and P. Rizo, "Noncontact fluorescence diffuse optical tomography of heterogeneous media," Appl. Opt. 46, 4896–4906 (2007).
8. N. Otsu, "A threshold selection method from gray-level histograms," IEEE Trans. on Syst. Man, Cybern. 9, 62–66 (1979).
9. H. Dehghani, "Near infrared optical tomography using nirfast: Algorithm for numerical model and image reconstruction," Commun. Numer. Methods Eng. 25, 711–732 (2009).

Modélisation semi-analytique avancée de l'inspection ultrasonore des structures en bétonN. Khalid¹, M. Darmon¹, J-F. Chaix²¹ : Université Paris-Saclay, CEA, List, F-91120 Palaiseau France,² : Aix Marseille Université, Avenue Gaston Berger, 13625 Aix-En-Provence, France
nouhaylakhalid@gmail.com**Résumé**

Le béton est un matériau fortement hétérogène: la présence d'hétérogénéités (granulats, porosités, micro-fissures,...) y entraîne une dépendance fréquentielle de la vitesse du son (dispersion) et de l'atténuation des ondes ultrasonores, qui affectent les Contrôles Non-Destructifs (CND) par ultrasons des structures en béton. Il est donc important de modéliser avec précision l'atténuation des ondes due à la diffusion multiple par les différents diffuseurs présents dans les bétons. Des simulations rapides peuvent être obtenues par des modèles analytiques simplifiés. Certaines propriétés du béton sont alors mal prises en compte, bien qu'ayant une influence notable sur les observables d'inspection: par exemple, le caractère 3D du milieu, la diffusion par les porosités, la distribution spatiale des granulats dans le milieu, leur forte concentration, leur granulométrie... Pour intégrer ces propriétés, une nouvelle approche en homogénéisation 2D est proposée pour les milieux denses, suivie d'une approche 3D. Les deux modèles 2D et 3D permettent de prédire l'atténuation et la vitesse des ondes ultrasonores diffusées par plusieurs distributions d'inclusions (circulaires ou sphériques) de différents matériaux (présence de pores à côté des granulats) et de tailles variées (granulométrie). L'avancée majeure de la modélisation analytique proposée est la prise en compte dans les modèles d'une fonction de corrélation entre diffuseurs décrivant de façon réaliste la distribution spatiale aléatoire des inclusions dans le milieu. Des erreurs de prédiction pointées dans la littérature pour de fortes concentrations de diffuseurs ont été corrigées grâce à notre approche. Les résultats analytiques conduisent en effet en 2D et en 3D à un bon accord avec des simulations numériques fondées sur la méthode des éléments finis.

Impact de la structuration des ondes ultrasonores sur la reconstruction Tomographique Acousto-Optique

L. Duclos¹, K. Xu¹, A. Louchet-Chauvet², F. Ramaz², C. Comtat¹

¹ Université Paris-Saclay, CEA, CNRS, INSERM, BioMaps, Service Hospitalier Frédéric Joliot, 91401 Orsay, France

² ESPCI Paris, Université PSL, CNRS, Institut Langevin, 75005 Paris, France

lucas.duclos@universite-paris-saclay.fr

Résumé

Nous montrons que l'utilisation d'ondes ultrasonores structurées (angles et fréquences optimisés) et d'un algorithme bayésien (MLEM régularisé) en tomographie acousto-optique améliore la résolution et la fidélité des reconstructions, même avec un nombre limité de scans (41), dépassant les performances des ondes planes. Cette approche ouvre des perspectives pour une imagerie rapide et précise de tumeurs précoces en profondeur.

1. Introduction

L'acousto-optique (AO) est une modalité d'imagerie hybride exploitant la modulation de la lumière diffusée par une onde ultrasonore afin de détecter des contrastes optiques dans des milieux diffusants (p. ex. cellules tumorales).

L'interaction entre ultrasons et photons permet d'extraire des contrastes fonctionnels inaccessibles par l'échographie seule, tout en dépassant les limites de pénétration de l'optique balistique. L'un des défis majeurs de cette modalité réside dans l'optimisation du temps d'acquisition. Dans un milieu vivant, les mouvements physiologiques peuvent induire des décalages spatio-temporels entre les acquisitions. Contrairement à l'imagerie AO traditionnelle reposant sur des ondes focalisées, la tomographie acousto-optique (AOT) à angle limité permet une acquisition plus rapide au détriment d'une perte de résolution latérale. En générant des ondes planes sous différents angles d'incidence (compris entre -20° et $+20^\circ$) et en structurant l'émission des éléments piézoélectriques du transducteur (figure 1), il devient possible de compenser partiellement la perte de résolution latérale due à la restriction angulaire tout en préservant la rapidité d'acquisition^[1].

L'objectif de notre étude est d'optimiser conjointement le protocole d'acquisition et les stratégies de reconstruction tomographique afin de concilier rapidité et précision diagnostique. Les performances des algorithmes de reconstruction tomographique sont évaluées en fonction du nombre d'émissions d'onde planes ultrasonores et de leur structuration, pour des données simulées.

2. Méthode

Le signal acousto-optique mesuré (y) résulte de l'interaction, dans le plan XZ, entre l'image des propriétés optiques (λ) et l'enveloppe du champ acoustique (A) (voir figure 1), selon le modèle linéaire $y = A\lambda$. La reconstruction de λ à partir de y constitue un problème inverse mal posé, nécessitant des méthodes de reconstruction tomographiques itératives.

Dans notre étude, nous utilisons l'algorithme itératif de maximisation de la vraisemblance MLEM, avec et sans terme de régularisation quadratique^[2]. Celui-ci permet de stabiliser la solution et d'améliorer la robustesse de la reconstruction, au prix du réglage d'un hyperparamètre pondérant le poids du terme de régularisation. La matrice A est estimée à l'aide du logiciel de simulation de champs acoustiques K-Wave^[3]. Les données y utilisées dans cette étude sont également simulées à partir du même logiciel.

On considère d'une part une insonification du milieu en ondes planes avec des angles compris entre -20 et 20° , et d'autre part une insonification en ondes structurées, constituée d'un assortiment de différents angles (toujours entre -20 et 20°) et différentes fréquences spatiales. Les angles et fréquences de structuration (on/off) sont sélectionnés pour couvrir de manière homogène toute la plage angulaire et fréquentielle en fonction du nombre de scans, afin d'optimiser la distribution des données acquises.

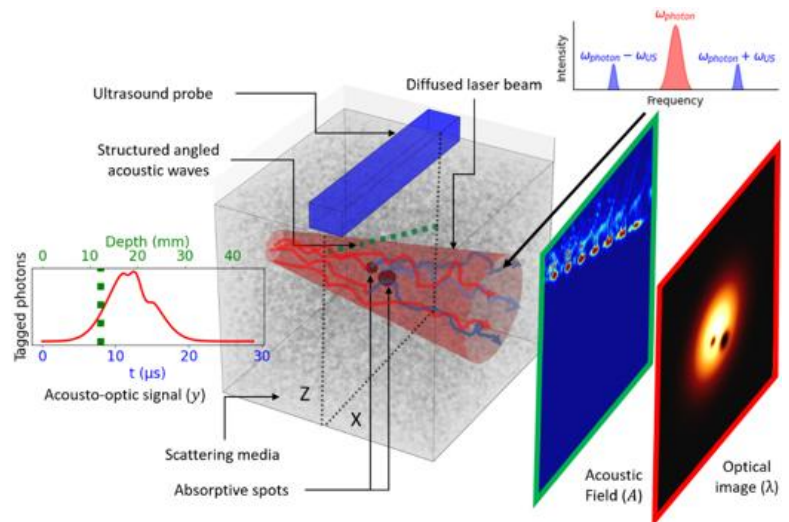


Figure 1. Schéma imagerie AO par une onde structurée inclinée

3. Résultats

Le choix du type d'onde acoustique émise affecte directement la qualité de l'image optique reconstruite. Pour un nombre donné d'émissions US (41) réparties entre -20° et $+20^\circ$, la figure 2 montre que les ondes structurées permettent une reconstruction plus fidèle et plus rapide que les ondes planes.

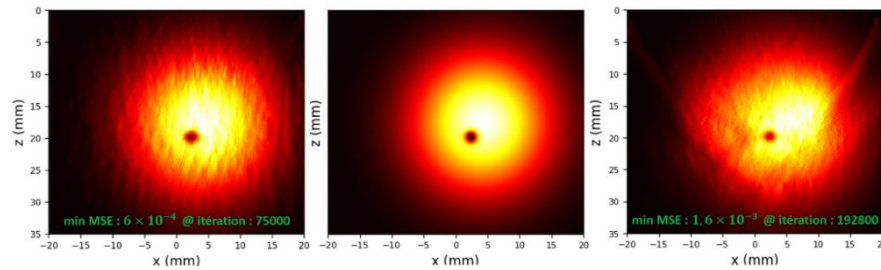


Figure 2. Reconstructions MLEM sans régularisation avec 41 émissions ultrasonores planes (droite) ou structurées (gauche), pour un nombre d'itérations minimisant l'erreur quadratique moyenne (MSE) avec la vérité terrain (centre)

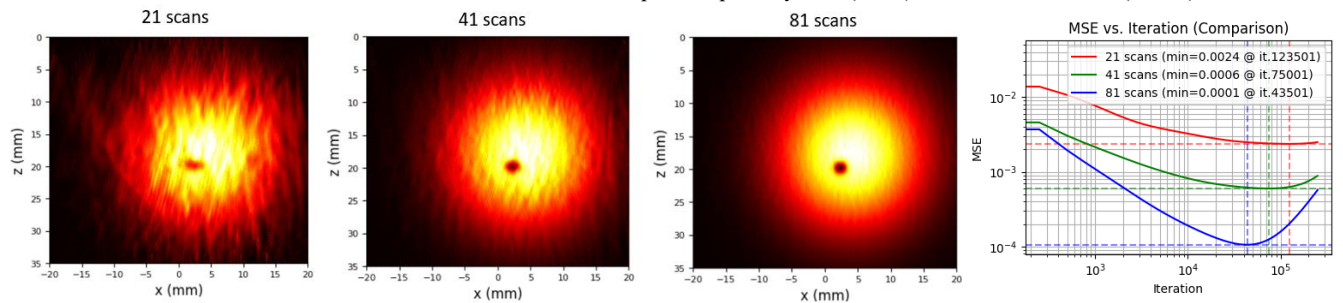


Figure 3. Reconstructions MLEM sans régularisation avec 21,41 et 81 émissions ultrasonores structurées et évolution de l'erreur quadratique moyenne (MSE) en fonction du nombre d'itérations.

La figure 3 montre l'évolution de la qualité de l'image en fonction du nombre d'émissions ultrasonore structurées (scans), avec une amélioration progressive de la fidélité.

Pour 41 scans structurés, la figure 4 montre que l'algorithme MLEM régularisé permet une convergence plus rapide (MSE inférieur à même nombre d'itérations) et une fidélité accrue (MSE min. de $4 \cdot 10^{-4}$ versus $6 \cdot 10^{-3}$) par rapport à la reconstruction sans régularisation. La reconstruction obtenue présente une meilleure définition des contours et une réduction significative des artefacts, confirmant que la structuration des ondes, associée à la régularisation, améliore à la fois la rapidité de convergence et la précision de l'image.

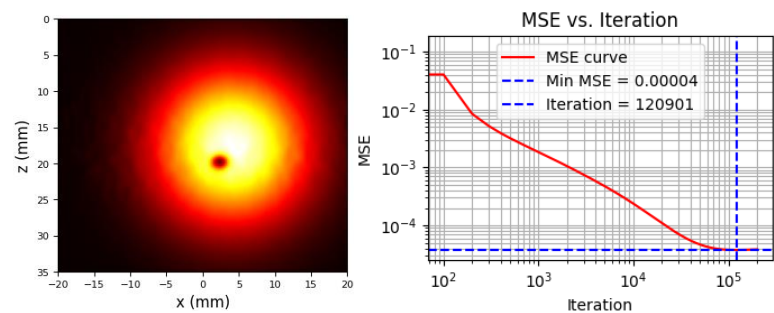


Figure 4. Reconstruction MLEM avec régularisation de 41 scans structurés et évolution de l'erreur quadratique moyenne (MSE) en fonction du nombre d'itérations.

4. Conclusion

Ces résultats montrent que l'utilisation d'ondes structurées, combinée à des algorithmes de reconstruction adaptés, permet d'optimiser le compromis entre temps d'acquisition et qualité d'image. La structuration du champ acoustique repousse les limites de l'AOT en onde plane et améliore considérablement la résolution selon X des images reconstruites. À court terme, ces méthodes seront validées expérimentalement sur des fantômes imitant des tissus biologiques, puis étendues à des milieux plus complexes, incluant des hétérogénéités optiques et acoustiques. À plus long terme, cette approche pourrait être intégrée dans des protocoles cliniques pour l'imagerie fonctionnelle de tumeurs ou de lésions profondes, où la rapidité et la précision sont essentielles.

5. Remerciements

Ce travail a bénéficié d'un financement par France Life Imaging (ANR-11-INBS-0006).

6. Bibliographie

- [1] M. Bocoum, J.-L. Gennisson, J.-B. Laudereau, A. Louchet-Chauvet, J.-M. Tualle et F. Ramaz, « Structured ultrasound-modulated optical tomography », *Applied Optics*, vol. 58, p. 1933, mars 2019.
- [2] A. R. De Piero, « A modified expectation maximization algorithm for penalized likelihood estimation in emission tomography », *IEEE Transactions on Medical Imaging*, vol. 14, n° 1, p. 132–137, 1995.
- [3] B.E. Treeby, E. S. Wise, F. Kuklis, J. Jaros et B. T. Cox, « Nonlinear ultrasound simulation in an axisymmetric coordinate system using a k-space pseudospectral method », *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 148, p.2288–2300, 2020

Liste des participants

- Akjouj Abdellatif
- Al Sheikh Lamis
- Allard Thomas
- Allietta Clémence
- Alvear Eduardo
- Antigny Hugo
- Armbruster Fériel
- Aubry Alexandre
- Alexandra Richard
- Badon Amaury
- Baida Fadi
- Ballandras Sylvain
- Banon Jean-Philippe
- Baron Thomas
- Bennet Pauline
- Benon Nathanaëll
- Berguiga Lotfi
- Bernal-Artajona Maria-Pilar
- Berthelot Gabriel
- Besbes Mondher
- Beugnot Jean-Charles
- Bonilla Matthieu
- Bouderbai Ramy
- Boulant Thibault
- Bourquard Claire

- Braud Aymeric
- Brosseau-Habert Nicolas
- Calmettes Cyril
- Carrillo Larrea Juan Manuel
- Centeno Emmanuel
- Chabrol Lilian
- Charlet Thibault
- Chauvet Mathieu
- Chehami Fadhila
- Colombel Simon
- Coumbassa Mabinty
- Courjal Nadège
- Crunteanu Aurelian
- Cvetkovic Danica
- Da Silva Anabela
- Danielou Gwenvael
- Dareau Arthur
- Darnon Maxime
- De Fornel Frédérique
- Degiron Aloyse
- Demullier Charlotte
- Destouches Nathalie
- Devel Michel
- Devolder Thibaut
- Dienot Jean-Marc
- Dubois Tristan
- Duclos Lucas
- Ducros Nicolas
- Duguet Antoine
- Dutron Théo
- Elsayy Mahmoud
- Euphrasie Sébastien

- Fawaz Hassan
- Fayssaud Jean-David
- Fehrembach Anne-Laure
- Ferreira Leonardo
- Froehly Luc
- Fromenteze Thomas
- Frouin Louis
- Garbaye Louis
- Gauthier-Lafaye Olivier
- Gazzah Houcem
- Geffrin Jean-Michel
- Gieraltowski Jacek
- Gozhyk Iryna
- Gralak Boris
- Grenier Katia
- Gueroult Renaud
- Guiffaut Christophe
- Guyomard Teddy, André, Guy
- Haidar Oumaima
- Hirsinger Laurent
- Hiscock Thomas.
- Hu Jialin
- Jacquet Quentin
- Kalt Victor
- Kermène Vincent
- Khalid Nouhayla
- Khallouf Charbel
- Khallouf Charbel
- Koubaa Souha
- Krachmalnicoff Valentina
- Lafond Olivier
- Lalanne Philippe

- Langevin Denis
- Laroche Thierry
- Larrue Florian
- Laude Vincent
- Lavignac Marion
- Le Grand Mathys
- Lebbe Nicolas
- Lenoir Bertrand
- Lesselier Dominique
- Lévy Pierre-Etienne
- Lheurette Eric
- Litman Amelie
- Macias Demetrio
- Maitre Damien
- Malaval François
- Margerin Ludovic
- Marques Lucie
- Maystre Daniel
- Mazé-Merceur Geneviève
- Medrar Ghiles
- Meftah Nawel
- Melle Christophe
- Milcent Simon
- Momeni Yasaman
- Monfrin Damien
- Monmayrant Antoine
- Morel Romain
- Nguyen Pascal
- Oluwatosin Ore-Oluwa
- Pacheco João Luiz
- Pannetier Lecoeur Myriam
- Parmantier Jean-Philippe

- Perera Buddhenn
- Perraud Richard
- Piau Gerard-Pascal
- Picon Thomas
- Pierrat Romain
- Pierre Juliette
- Pourny Charles
- Richalot Elodie
- Richard Théo
- Rideau Denis
- Rius Eric
- Rodriguez-Vega Martin
- Rogemont Arnaud
- Röhligh David
- Salzenstein Patrice
- Samara Elio
- Sarrade Adrien
- Schutz Maxime
- Séguin Olivier
- Serpaud Sébastien
- Sibille Alain
- Sobas Justin
- Solignac Aurélie
- Suarez Miguel
- Sylvestre Thibaut
- Taleb Hiba
- Todorov Yanko
- Touboul Marie
- Trouvé-Peloux Pauline
- Uche Chidinma Nnekwu
- Ugarak Fehima
- Vinod Saranathan

- Valerio Guido
- Vigneswaran Sujeevan
- Watt Dieynaba Mamadou
- Yohan Bouyer
- Zaknounge Mohammed

Liste des auteurs

Abdel-Ghaffar Eman, 112
Adam Ronan, 160, 161
Akjouj Abdellatif, 112–114
Al Wahsh Housni, 112
Albanese Anthony, 78–80
Allard Thomas, 71
Alvear Eduardo, 52
Amory Lucile, 160, 161
Antigny Hugo, 104, 105
Arepolage Thiwanka, 76, 77
Arnoult Alexandre, 94, 95
Arribat Mathieu, 94, 95
Artaud Noan, 173–177
Arthur De Sousa Lopes Moreira, 106, 107
Assier Raphaël, 5, 6
Aubry Alexandre, 21

Baida Fadi, 42, 43
Ballandras Sylvain, 147, 148
Baron Thomas, 106, 107, 147, 148
Barrera Cyrille, 104, 105
Begaud Xavier, 145, 146
Benabid Fetah, 18–20
Benmessaoud Wanissa, 116, 117
Bennet Pauline, 47, 48, 67, 68
Benon Nathanaëll, 106–109
Benzerga Ratiba, 160, 161
Berguiga Lotfi, 96, 97
Bernal Maria-Pilar, 42, 43
Bernard Loic, 160, 161
Besbes Mondher, 50, 51
Bessou Aya Maroua, 141, 142
Beugnot Jean-Charles, 102, 103
Blandin Tanneguy, 94, 95
Bonduelle Clément, 67, 68
Boni Salifou Radjaou, 171, 172
Boulliard Guillaume, 100, 101
Boutghatin Mohamed, 113, 114
Braud Aymeric, 58–62
Breiss Hanadi, 160, 161
Brosseau-Habert Nicolas, 72, 73
Brûlé Yoann, 78–80
Burgnies Ludovic, 149, 150
Burokur Shah Nawaz, 90, 91

Charbonnier Benoît, 78–80
Chardon-Grossard Yann, 67, 68
Chauvet Mathieu, 106–109
Chehami Fadhila, 87, 88
Chevalier Céline, 81, 82
Clini De Souza Arthur, 9, 10
Cluzel Benoît, 78–80
Coillet Aurélien, 78–80
Colombel Simon, 102, 103
Comtat Claude, 184, 185
Coumbassa Mabinty, 69, 70
Courjal Nadege, 42, 43
Cvetkovic Danica, 169, 170

Da Silva Anabela, 133, 134, 181, 182
Danielou Gwenvael, 160, 161
Darche Michaël, 5, 6
Dareau Arthur, 131, 132
Darmon Michel, 183
Daudy Yves, 162–164
De Sousa Lopes Moreira Arthur, 108, 109
Debord Benoît, 18–20
Decroze Cyril, 87, 88
Degiron Aloyse, 100, 101
Delhote Nicolas, 143, 144
Deltimple Nathalie, 137, 138
Demullier Charlotte, 74
Desfarges-Berthelemot Agnès, 18–20
Destouches Nathalie, 14, 15, 85, 86
Devel Michel, 72, 73
Devolder Thibaut, 3
Dienot Jean-Marc, 173–177
Djafari-Rouhani Bahram, 74
Dobrzynski Leonard, 112
Doll Andrin, 116, 117
Dorval Paul, 181, 182
Dubois Tristan, 152, 153
Duboz Jean-Yves, 94, 95
Dubuc David, 2
Duchamp Geneviève, 152, 153
Duché David, 67, 68
Duclos Lucas, 184, 185
Ducros Nicolas, 35
Duguet Antoine, 152, 153

Callard Segolène, 81, 82
Calmettes Cyril, 74
Calvez Stéphane, 98, 99
Centeno Emmanuel, 63, 64
Cerdan Benjamin, 2
Chabrol Lilian, 65, 66

Dusch Yannick, 113, 114
 Dutron Théo, 106–109

 El Boudouti El Houssaine, 113, 114
 El Korso Mohammed Nabil, 90, 91
 Elsawy Mahmoud, 9, 10
 Enzo Isnard, 9, 10
 Euphrasie Sébastien, 76, 77

 Fanjoux Gil, 102, 103
 Fayssaud Jean-David, 42, 43
 Fehrembach Anne-Laure, 104, 105
 Fermon Claude, 116, 117
 Ferrier Lydie, 81, 82
 Filloux Pascal, 100, 101
 Flahaut Emmanuel, 2
 Fromenteze Thomas, 87, 88
 Frouin Louis, 165–168
 Furger Christophe, 2

 Gapillout Damien, 42, 43
 Garbaye Louis, 154, 155
 Gauthier-Lafaye Olivier, 94, 95, 98, 99
 Gavrilenko Veronika, 173–175
 Gazzah Houcem, 118
 Geffrin Jean-Michel, 121–124
 Gelly Roman, 9, 10
 Gharbi Siwar, 18–20
 Gironde Camille, 2
 Gobé Benjamin, 18–20
 Grenier Katia, 2
 Guenneau Sébastien, 5, 6
 Gueroult Renaud, 58, 59
 Guichardaz Blandine, 141, 142
 Guiffaut Christophe, 162–164
 Guyomard Teddy, André, Guy, 156, 157
 Gérôme Frédéric, 18–20

 Haidar Oumaima, 113, 114
 Hardy David, 152, 153
 Helbert David, 18–20
 Henry Maxime, 133, 134, 181, 182
 Hiscock Thomas., 30, 31
 Hu Jialin, 85, 86
 Hubert Christophe, 14, 15
 Huy Kien Phan, 102, 103

 Jacques Quentin, 158, 159
 Jager Jean-Baptiste, 78–80
 Josserand Veronique, 133, 134
 Josserand Véronique, 181, 182
 Junqua Isabelle, 176, 177

 Kalt Victor, 63, 64

 Kerhervé Eric, 137, 138
 Kermène Vincent, 18–20
 Khalid Nouhayla, 183
 Kinjalk Kumar, 98, 99
 Krachmalnicoff Valentina, 36

 Lallechere Sebastien, 169, 170
 Lamrini Oussama, 160, 161
 Langevin Denis, 47, 48, 67, 68
 Langlois Julien, 58, 59
 Larrue Florian, 55, 56
 Laude Vincent, 49, 89, 92, 93
 Laur Vincent, 149, 150
 Lavignac Marion, 81, 82
 Le Guével Xavier, 181, 182
 Le Van Doan, 14, 15
 Lebbe Nicolas, 7, 8
 Lecestre Aurélie, 94, 95
 Lepage Anne Claire, 145, 146
 Leray Aymeric, 76, 77
 Letartre Xavier, 81, 82
 Lheurette Eric, 149, 150
 Lhuillier Emmanuel, 100, 101
 Litman Amelie, 123, 124
 Lombard Bruno, 5, 6
 Louchet-Chauvet Anne, 184, 185
 Lévy Pierre-Etienne, 169, 170
 Lévêque Gaëtan, 113, 114

 Malaval François, 119, 120
 Margerin Ludovic, 33, 34
 Martin Olivier, 72, 73
 Mathieu Romain, 137, 138
 Mathmann Baptiste, 113, 114
 Mattana Richard, 129, 130
 Maurel Agnès, 7, 8
 Mavrikakis Parmenion, 72, 73
 Medrar Ghiles, 145, 146
 Meftah Nawel, 90, 91
 Melle Christophe, 44, 45
 Milcent Simon, 179, 180
 Millard Kyllian, 104, 105
 Mir Abdellah, 113, 114
 Miralles Tristan, 67, 68
 Monmayrant Antoine, 98, 99
 Moreau Antoine, 47, 48, 63, 64, 67, 68
 Morel Romain, 102, 103, 110, 111
 Mosset Alexis, 92, 93
 Moulin Julien, 116, 117

 Nguyen Hai Son, 81, 82
 Nguyen Pascal, 133, 134, 181, 182
 Noé Pierre, 78–80

Onofri Fabrice R.a., 65, 66
 Pacheco João Luiz, 135
 Pannetier-Lecoeur Myriam, 17, 116, 117
 PARMANTIER, Jean-Philippe, 27
 Paul Elodie, 116, 117
 Pennec Yan, 74, 112
 Petolat Marie, 100, 101
 Pham Kim, 7, 8
 Piat Arthur, 169, 170
 Picaud Sylvain, 72, 73
 Pichon Lionel, 169, 170
 Picon Thomas, 162–164
 Pierre Juliette, 12
 Popov Evgueni, 104, 105
 Pouant Clovis, 162–164
 Pouliguen Philippe, 160, 161
 Pourny Charles, 78–80
 Périgaud Aurélien, 143, 144

 Queste Samuel, 42, 43

 Ramaz François, 184, 185
 Ratni Badreddine, 90, 91
 Richalot Elodie, 125, 126
 Rideau Denis, 53, 54
 Rius Eric, 24
 Robert Laurent, 42, 43
 Rodriguez-Vega Martin, 133, 134, 181, 182
 Rogemont Arnaud, 78–80
 Roland Iannis, 100, 101
 Rosa Patrick, 129, 130
 Rousseaux Benjamin, 42, 43
 Ruiz-Herrero Carmen, 67, 68
 Ruscassié Robert, 173–177
 Rémi André, 181, 182
 Röhlig David, 83, 84

 Salaün Fabien, 74
 Salut Roland, 42, 43
 Salvador Franck, 152, 153
 Salzenstein Patrice, 141, 142
 Samara Elio, 123, 124
 Saucourt Jérémy, 18–20
 Sawant Rajath, 78–80
 Schanne Domitille, 100, 101
 Schutz Maxime, 38–41
 Sergeeva-Chollet Natalia, 116, 117
 Serpaud Sébastien, 28, 29
 Sharaiha Ala, 160, 161
 Smaali Rafik, 63, 64
 Smith David, 87, 88
 Solignac Aurélie, 116, 117, 129, 130

 Stéphane Lanteri, 9, 10
 Suarez Miguel, 42, 43
 Sylvestre Thibaut, 76, 77, 102, 103

 Talbi Abdelkrim, 113, 114
 Todorov Yanko, 13
 Touboul Marie, 5, 6
 Trouvé-Peloux Pauline, 127, 128

 Uche Chidinma Nnekwu, 139, 140
 Ugarak Fehima, 92, 93

 Valerio Guido, 23
 Vasko Kostiantyn, 18–20
 Verdeyme Serge, 143, 144
 Verdy Christophe, 76, 77
 Vergnole Sébastien, 18–20
 Vigneswaran Sujeevan, 137, 138
 Vivien Kimon, 137, 138
 Vocanson Francis, 14, 15
 Vynck Kevin, 85, 86

 Watt Dieynaba Mamadou, 143, 144
 Wojak Julien, 133, 134, 181, 182

 Yohan Bouyer, 149, 150

 Zaknounge Mohammed, 25
 Zinaoui Aiman, 42, 43
 Zuber Céline, 162–164

