

10ème Conférence Plénière du GDR Ondes

◊ Conférence Plénière

Prof Mickael TANTER, *L'imagerie ultrasons et ses applications pour les thérapies dans le cerveau*

◊ 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



**Mardi 19 et Mercredi 20
Décembre 2023**

> **INSCRIPTIONS**

<http://gdronesciencesconf.org>



gdr-ondes.cnrs.fr

1



**Aix Marseille Université, Faculté
de Médecine - Campus Timone**

Grand Hall, Amphi Toga et Amphi 1

10^{ème} Conférence Plénière du GDR Ondes

Aix Marseille Université, Faculté de Médecine - Campus Timone

Grand Hall, Amphithéâtre Toga et Amphi 1

Mardi 19 et Mercredi 20 Décembre 2023

Mardi 19 décembre 2023

Grand Hall - 8h30 - 9h30

Accueil Café et retrait des badges

Accrochage Posters dès 8h30

Amphi Toga - 9h30 – 10h15

Discours d'Ouverture (15')

Anne SENTENAC (30')

$\lambda=1$, un théoricien à l'origine du GDR Ondes

Amphi Toga - 10h15 - 11h15

Conférence plénière invitée

Mickael TANTER (60')

Imagerie et thérapie cérébrale par Ultrasons

Amphithéâtres - 11h15 - 12h45

Amphi Toga

Amphi 1

Exposés **GT1**

Exposés **GT3**

*Modélisation et
simulation*

*Capteurs, imagerie
et inversion*

Grand Hall - 12h45 - 14h00

Déjeuner Buffet

Grand Hall - 14h00 - 16h30

Session Posters GT1 – GT2 – GT3

Pause-café durant la session

Amphithéâtres - 16h30 - 18h00

Amphi Toga

Amphi 1

Exposés **GT2**

Exposés **GT5**

*Physique et ingénierie
des structures Sub- λ*

*Compatibilité
électromagnétique*

Grand Hall - 18h00 - 19h30

Cocktail – Apéritif musical

Diner Libre

Mercredi 20 décembre 2023

Grand Hall - Accrochage Posters dès 8h30

Amphithéâtres - 9h00 - 10h30

Amphi Toga

Amphi 1

Exposés **GT4**

Exposés **GT6**

Antennes et circuits

Imagerie en milieux complexes

Grand Hall - 10h30 - 11h00

Pause-café

Amphi Toga - 11h00 - 11h45

Bilans

GT, Club des Partenaires, Groupes de réflexion

Amphi Toga - 11h45 - 12h45

Exposés sollicités du Club des Partenaires

Grand Hall - 12h45 - 14h00

Déjeuner Buffet

Grand Hall - 14h00 - 16h30

Session Posters GT4 – GT5 – GT6

Pause-café durant la session

Amphi Toga - 16h30 - 16h45

Clôture de la Conférence Plénière

<https://gdrondes.sciencesconf.org>



Table des matières

Couverture	1
Programme de la conférence plénière	2
Lambda=1, un théoricien	3
Conférence plénière de Mickael Tanter	5
GT1 – Modélisation et simulation	1
Caractérisation des propriétés optiques des matériaux par régression symbolique : le retour d’une méthode d’IA quelque peu oubliée, Macias Demetrio	1
Résonances plasmoniques pour les cavités de métamatériaux, Carvalho Camille	3
Comprendre et prédire les propriétés acoustiques des instruments du patrimoine : le cas d’une trompette Besson du Musée de la Musique de Paris, Van Baarsen Tobias [et al.]	4
GT2 – Physique et ingénierie des structures sous-longueur d’onde	5
Super-absorption acoustique avec des bulles, Leroy Valentin	5
Nitride nanostructured light emitting diodes, Tchernycheva Maria	7
Modal Design of Interconnect-free Arithmetic and Logic Units in reconfigurable plasmonic cavities, Dujardin Erik	8
GT3 – Capteurs, imagerie et inversion	10

Retour d'expérience de la mission spatiale SMOS au service de la co-conception de la future mission FRESCH, Anterrieu Eric	10
Co-conception optique/réseau de neurones appliquée à la 3D monoculaire, Trouvé-Peloux Pauline [et al.]	12
Du capteur à haute sensibilité à l'instrumentation aux limites dans un monde de mesures, massifié et hyperconnecté., Dolabdjian Christophe	14
GT4 – Antennes et circuits : des micro-ondes aux ondes millimétriques et THz	15
Combiner harmonieusement les antennes dans un système de communication : Revue des défis pour la 5 et 6G, Doré Jean-Baptiste	15
Tendances actuelles dans la fabrication additive de composants passifs microondes, Delhote Nicolas	17
Les métamatériaux au service des transports et de la ville de demain, Seetharamdoo Divitha	18
GT5 – Compatibilité électromagnétique	19
La susceptibilité électromagnétique : de la fonction électronique à la fonction opérationnelle, Hoffmann Patrick	19
La VIRC : un moyen d'essai électromagnétique 2-en-1, Andrieu Guillaume	21
Menaces Electro-Magnétiques : les nouveaux enjeux émergents d'une aviation décarbonée, Flourens Franck	22
GT6 – Imagerie en milieux complexes : modélisation, instruments, traitements	24
Approches RF pour interroger les phénomènes de (dé)-polarisation spatiale lumineuse à l'échelle du grain de speckle, Staes Jonathan [et al.]	24
Etats sans réflexion dans les milieux désordonnés, Davy Matthieu	26
Diffusion multiple des ultrasons dans les matériaux granulaires et renversement du temps, Tourin Arnaud	28
Club des partenaires	30

L'innovation Spatiale au service de la défense, Bellion Anthony	30
Simulations Radar de la Conception aux Performances Système pour l'Aérospatiale et la Défense, Moknache Amazir	32
JCAS for 6G Application, Fombonne Cyril [et al.]	33
Posters GT1	34
Explicit modelling and optimisation of acoustic meta-lenses for baffled sources, Cav- alieri Théo [et al.]	34
Optimisation topologique large bande de réseaux blazés sous incidence conique, Ans Simon [et al.]	38
Remodeler les plasmons localisés à l'aide de matériaux de permittivité proche de zéro : Application à l'identification des molécules par l'effet SEIRA, Smaali Rafik [et al.]	40
Venez à la découverte de PyMoosh et Nevergrad, Bennet Pauline [et al.]	41
Etude de l'efficacité d'extraction de la lumière d'un réseau résonant sinusoïdal, Vic- tor Kalt [et al.]	43
Generalized Drude-Lorentz model complying with the Singularity Expansion Method, Ben Soltane Isam [et al.]	43
Démonstration d'un solveur modal pour les problèmes électromagnétiques, libre et gratuit, basé sur les éléments finis avec les logiciels ONELAB/Gmsh/GetDP, Ren- versez Gilles [et al.]	46
Measurement of photo-induced thermal radiation in optical coatings, Thullier François [et al.]	49
La méthode DADI-inverse : un outil pour calculer les polarisabilités atomiques dynamiques, Brosseau-Habert Nicolas [et al.]	51
Characterizing the optical properties of a bio-inspired material using Symbolic Regression, Sierra Velez Julian [et al.]	53
High frequency homogenization for periodic dispersive media, Vial Benjamin [et al.]	55
Propagation d'ondes électromagnétiques hautes fréquences dans des milieux bian- isotropes hétérogènes dispersifs, Savin Eric	57

Reconfigurable Intelligent Surfaces: A Practical Scattering Model Based on Green's Theorem, Ezzeddine Hussein [et al.]	59
Faisceaux non diffractifs pour les liaisons sans fil RF opérant dans la région de Fresnel, Pimenta Ravel [et al.]	62
Étude de la dynamique des corrélations de densité d'atomes froids dans un speckle optique, du régime diffusif à la transition d'Anderson, Banon Jean-Philippe [et al.]	64
Outil logiciel de modélisation de nanostructures photoniques : SimPhotonicsFMM Matlab Toolbox, Besbes Mondher	66
Caractérisation hyperfréquence de systèmes multi-antennes sur porteur, à partir de mesures de Surface Equivalente Radar, et détermination du périmètre d'utilisation comparativement aux méthodes classiques., De Kat Jean	68
Posters GT2	71
Pompage topologique autour d'une symétrie glissée d'une chaîne phononique, Iglesias Martínez Julio Andrés [et al.]	71
Métasurface Modulée Temporellement pour Conversion de Fréquence, Lopez Tanguy [et al.]	74
Excitation sélective de modes d'ordres supérieurs dans un réseau résonnant en cavité, Rouxel Antoine	76
Super-resolution imaging from the sound of a resonating bubble, Bouchet Dorian [et al.]	78
Empilements multidiélectriques à absorption contrôlée vers une microscopie de fluorescence à réflexion totale interne exaltée, Toumi Yousra [et al.]	79
Qualitative characterization of Au thin films by scattering Scanning Nearfield Optical Microscopy (s-SNOM), Allard Valentin	81
Low-Noise Optical Parametric Amplifier Source for Stimulated Raman Scattering Imaging, Martin Ines [et al.]	83
Observation of quasi-invariant photocarrier lifetimes in PbS nanocrystal assemblies coupled to resonant and non-resonant optical antennas, He Puyuan [et al.] .	85
Caractérisation exhaustive et contrôle non destructif des structures multicouches sur banc de mesure térahertz multimodal, Abautret Yannick [et al.]	86
Theory and design of Passive Daytime Radiative Coolers, Namazzade Nigar [et al.]	89

Nonlinear spin-orbit coupling in optical thin films, Coudrat Laure [et al.]	92
Posters GT3	93
Full waveform inversion for ultrasound tomography - Imaging musculoskeletal tissue in children, Doveri Elise [et al.]	93
Towards CARS Fourier Ptychography Microscopy, Fantuzzi Eric Michele [et al.] .	96
Impulsive stimulated Raman scattering imaging using an ultra-fast acoustic-optics delay line, Suresh Sisira	98
Tests statistiques pour l'analyse d'acquisitions hyperspectrales codées, Dinh Trung-Tin	100
Assessment of compressive Raman spectroscopy to image and classify microplastics from natural marine environment., Grand Clément	102
Stimulated Raman Histology for Cancer detection using Stimulated Raman Scattering microscope, Ahmad Youssef	104
Elastic waves in soft matter : a physical approach to cochlear tonotopy, Croquette Samuel [et al.]	107
Stimulated Raman Histology: from tissue to diagnosis, De Leon Lazaro Javier [et al.]	109
Faire progresser l'imagerie du sein grâce à la fusion de données et à l'apprentissage par transfert : une exploration complète, Noël Valentin [et al.]	111
Noise correlation elastography for full field optical imaging systems, Dufour Nina	114
Optical Metrology Instrument Based on Low Coherence Interferometry for High Precision Applications, Khan Imran [et al.]	116
Posters GT4	118
Prothèse de genou instrumentée à l'aide d'un implant électronique RFID passif, Vena Arnaud [et al.]	118
Métasurface reconfigurable pour l'estimation de la direction d'arrivée, Meftah Nawel [et al.]	121
Fabrication monolithique d'un filtre passe bande à cavités bi-mode en SLM dans la bande K, Peres Bastien [et al.]	123

Etude et conception des métasurfaces reconfigurables en transmission intégrant des matériaux à changement de phase (PCM), Renkanga Mbatchi Wilfrid [et al.]	125
Mécanismes de rayonnement d'une antenne dipôle placée au-dessus d'un milieu diélectrique : l'importance de l'impédance de surface, Alves Thierry	127
EM energy harvesting solution from ambient railway communication systems based on focusing metasurfaces, Kalaagi Mohammed [et al.]	129
Posters GT5	131
Evaluation rapide de l'exposition des personnes autour de systèmes de transfert d'énergie sans contact pour véhicule électrique par techniques de métamodélisation, Pichon Lionel [et al.]	131
Electromagnetic Compatibility (EmC) methodology to take into account the common mode interferences on EEAs ensuring critical functional safety levels, Hamard Baptiste [et al.]	134
Mise en évidence de défaillances rapides et tardives en VIRG à l'aide d'un équipement de test générique approprié, Jacquet Quentin [et al.]	136
Filtres actifs pour la réduction des émissions conduites des convertisseurs de puissance, Perraud Richard [et al.]	137
Étude du comportement d'une chaîne de mesure de température face à des impulsions électromagnétiques intentionnelles, Duguet Antoine [et al.]	140
Nouvelle méthodologie d'optimisation de conception de cartes aéronautiques intégrant des liens haute vitesse jusqu'à 40 Gbps : compromis entre performance et coût, Le Bihan Soazig [et al.]	142
Modèle d'estimation de la susceptibilité conduite à partir d'une injection champ proche entre 500 MHz et 2 GHz, Castagnet Nicolas [et al.]	145
Investigations on Conducted Emissions due to a Bidirectional On-board Charger: Impact of the Grid Configuration, Seddighi Mohsen	148
Filtre Actif Haute Fréquence Pour Convertisseurs De Puissance AC/DC, Sifoune Sarah [et al.]	150
Development of a 5G Backscatter Communication Tag's Architecture for RF signal propagation in an urban environment, Lefki Mariem	152
Conception d'un illuminateur local en onde quasi-plane en bande L, Barouki Sami [et al.]	155

Caractérisation et modélisation haute fréquence des bobinages statoriques pour la prise en compte de la CEM et de la fiabilité électromagnétique dans les motorisations électriques., Coutin Steven [et al.]	157
Posters GT6	159
Experimental investigation of multiple ultrasound scattering in dense granular suspensions, Jia Xiaoping	159
Microscopie super-résolue par illumination de speckle en profondeur de champ étendue, Mazzella Lorry [et al.]	161
CSSNet - Classification spectrale supervisée d'acquisitions codées d'images hyperspectrales, Paillet Léo	163
Open channels and dwell-time eigenstate in resonant disordered media, Rescanieres Romain [et al.]	165
Le seuil de mobilité d'Anderson vu comme une transition de percolation du paysage de localisation, Vrech Margaux [et al.]	167
Quantification du poids des défauts et de la contamination dans les pertes par diffusion lumineuse des composants optiques hautes performances, Bolliand Adrien [et al.]	168
Architecture laser semiconducteur versatile pour excursions en fréquences rapides et précises, Llauze Thomas [et al.]	170
Imagerie en polarimétrie de Mueller pour améliorer l'exploration optique des tissus durant les chirurgies, Courilleau Aymeric	172
Shaping evanescent waves for optogenetic activation of live cells, Grosjean Marc .	174
Liste des participants	175
Liste des auteurs	181

Lambda=1, un théoricien à l'origine du GDR Ondes

Anne Sentenac¹

¹ : *Institut Fresnel, Marseille*
anne.sentenac@fresnel.fr

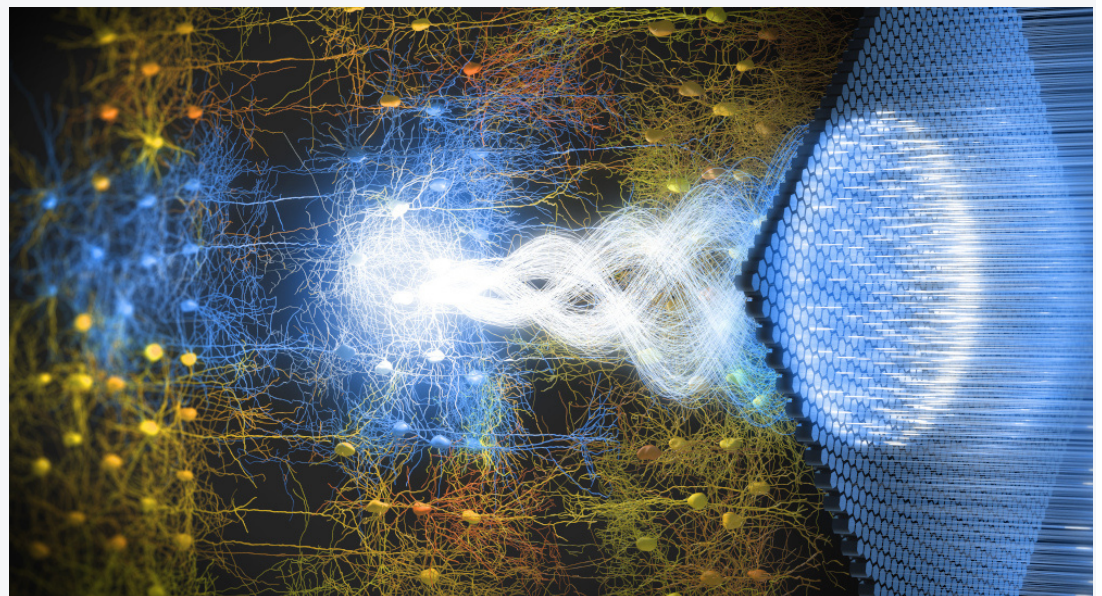
Pour célébrer le 10ième anniversaire de la conférence plénière du GDR ondes et son retour à Marseille, nous évoquerons la vie (scientifique) du grand chercheur marseillais qui a créé le GDR ondes et fut à l'origine de l'Institut Fresnel, Daniel Maystre. Nous montrerons comment son parcours de théoricien/numéricien l'a convaincu de l'importance du dialogue entre les différentes communautés travaillant sur les ondes.



Dr Mickael TANTER

Directeur de recherche INSERM au
Laboratoire Physics for Medicine
ESPCI Paris - PSL, INSERM, CNRS

Imagerie et thérapie cérébrale par Ultrasons



Conférence ouverte à tous les personnels et étudiants

Mardi 19 décembre 2023 à 10h00

Amphi TOGA

"(...) Au delà des applications des ultrasons permettant la "lecture" de l'activité cérébrale, nos travaux récents montrent ainsi qu'il est possible d' "écrire" dans le cerveau par ultrasons grâce au concept récent de **sonogénétique**. Les premières preuves de concept démontrent qu'il devrait être prochainement possible de restaurer la vision chez les patients aveugles en imprimant directement dans le cortex visuel des images du monde qui les entoure."

Imagerie et thérapie cérébrale par Ultrasons

Les ultrasons biomédicaux ont vécu une véritable révolution au cours des vingt dernières années. Dans le domaine de l'imagerie, trois barrières fondamentales ont été dépassées - la résolution temporelle, la sensibilité au flux sanguin et la résolution spatiale - de plusieurs ordres de grandeur. Ces changements conceptuels ont un impact majeur dans le domaine de la radiologie et tout particulièrement dans le domaine de l'imagerie du cerveau tant pour la recherche fondamentale en neurosciences que pour les applications cliniques en neuroimagerie.

Tout d'abord, en s'appuyant sur le concept de l'holographie acoustique, l'imagerie par ultrasons ultra-rapide à des milliers d'images par seconde a rendu possible la détection de très subtiles variations du flux sanguin dans de petits vaisseaux cérébraux pendant l'activité neuronale et a introduit l'imagerie fonctionnelle par ultrasons (fUSi) en tant que modalité d'imagerie cérébrale à part entière. Sa portabilité, son coût et sa sensibilité le rendent particulièrement adapté à l'imagerie cérébrale pendant le comportement, l'apprentissage ou les études cognitives chez des animaux éveillés et en liberté, pour la connectomique cérébrale fonctionnelle dans les modèles animaux de petite taille, pour les neurosciences systémiques. Des applications cliniques sont déjà à l'étude pour l'imagerie cérébrale fonctionnelle clinique chez les nouveau-nés humains, pour l'imagerie fonctionnelle per-opératoire et pour les futures interfaces cerveau-machine sans contact.

Deuxièmement, lorsqu'elle est associée à des agents de contraste injectés par voie intraveineuse, l'imagerie ultra-rapide permet une imagerie non invasive *in vivo* de l'hémodynamique cérébrale à l'échelle microscopique dans l'ensemble du cerveau. Cette Microscopie de Localisation par Ultrasons (ULM) du système cérébro-vasculaire est obtenue en localisant et en suivant la position exacte de millions de microbulles de 1 à 3 μm de diamètre se déplaçant dans le réseau vasculaire cérébral. Enfin, en suivant la dynamique de ces microbulles pendant l'activité neuronale, il est possible, pour la première fois, d'effectuer une imagerie cérébrale fonctionnelle de l'ensemble du cerveau à l'échelle microscopique chez les rongeurs. Avec les preuves croissantes de dysfonctionnement vasculaire ou neurovasculaire précoce dans les maladies du développement neurologique et neurodégénératives, une telle Microscopie de Localisation par Ultrasons fonctionnelle pourrait améliorer la compréhension fondamentale, le dépistage précoce et la surveillance des altérations dans le cerveau en développement et en vieillissement. Les ultrasons sont donc la première modalité médicale capable de voir de manière totalement non invasive l'ensemble d'un organe à l'échelle microscopique.

Au delà des applications des ultrasons permettant la "lecture" de l'activité cérébrale, nos travaux récents montrent ainsi qu'il est possible d' "écrire" dans le cerveau par ultrasons grâce au concept récent de sonogénétiq. Les premières preuves de concept démontrent qu'il devrait être prochainement possible de restaurer la vision chez les patients aveugles en imprimant directement dans le cortex visuel des images du monde qui les entoure.

GT1 – Modélisation et simulation

Caractérisation des propriétés optiques des matériaux par régression symbolique : le retour d'une méthode d'IA quelque peu oubliée

Demetrio Macias

¹ *Laboratoire Lumière, nanomatériaux et nanotechnologies – L2n, Université de Technologie de Troyes & CNRS EMR 7004, 12 rue Marie Curie, CS 42060, 10004 Troyes Cedex, France
Email : demetrio.macias@utt.fr*

Résumé

Les Réseaux Neuronaux (RN) ont été déjà utilisés il y a une vingtaine d'années pour caractériser des réseaux de diffraction en résolvant le problème inverse. Toutefois, c'est grâce à l'évolution de la puissance de calcul des ordinateurs et au développement de bibliothèques numériques d'IA gratuites, fiables et relativement faciles à appréhender, que l'utilisation des RN dans le domaine de la nanophotonique a pris son essor. Cependant, malgré les résultats spectaculaires obtenus avec ces outils numériques, les RN sont considérés comme des "boîtes noires". En effet, il est difficile de savoir comment ils établissent les relations entre les différentes données du problème étudié. Dans cette présentation, nous discuterons des possibilités et des limites d'une autre méthode d'Apprentissage Automatique, la Régression Symbolique (RS), utilisée pour caractériser les propriétés optiques de diverses structures photoniques. Cette "boîte transparente", proposée au milieu des années 1990, n'a connu que récemment un regain d'intérêt car elle offre la possibilité d'extraire des expressions fermées, à partir de données expérimentales, sans qu'il soit nécessaire de formuler des hypothèses préalables sur la forme algébrique du modèle recherché.

Résonances plasmoniques pour les cavités de métamatériaux

Camille Carvalho,

Univ Lyon, INSA Lyon, UJM, UCBL, ECL, CNRS UMR 5208, ICJ, F-69621, France

Department of Applied Mathematics, UC Merced, Merced, USA

camille.carvalho@insa-lyon.fr

Résumé

La diffraction dans des cavités optiques (de matériaux dits classiques) peut présenter des phénomènes localisés de forte intensité dus aux résonances de scattering de la cavité, et celles-ci créent de fortes instabilités numériques lorsque l'on discrétise le problème. Les cavités de métamatériaux se distinguent de par leurs propriétés optiques remarquables, dont notamment la possibilité d'exhiber une permittivité effective négative. Ce changement de signe permet l'apparition d'ondes localisées appelées plasmons de surface, dont le contrôle s'avère difficile (mais offre de nombreux avantages pour l'imagerie haute-résolution et la transmission de l'information). A-t-on des résonances de scattering pour les cavités de métamatériaux ? Créent-elles des instabilités numériques ? Sont-elles liées à des plasmons de surface ? Nous proposons de répondre à ces questions lors de cet exposé dans le cadre de cavités 2D (de géométrie lisse arbitraire et permittivité arbitraire).

Ceci est en collaboration avec Zoïs Moitier (INRIA POEMs, ENSTA Paris).

Comprendre et prédire les propriétés acoustiques des instruments du patrimoine : le cas d'une trompette Besson du Musée de la Musique de Paris

Juliette Chabassier¹

¹ MAKUTU Inria team, 200 avenue de la vieille tour, 33400 TALENCE,
Juliette.chabassier@inria.fr

Résumé

Jouer les instruments à vent historiques est souvent incompatible avec la conservation et la protection des collections des musées. Certaines propriétés musicales et acoustiques de ces instruments restent donc inconnues. Des modèles théoriques peuvent prédire certaines de ces propriétés à partir de la seule connaissance de la géométrie de l'instrument. Une collaboration entre l'équipe de Makutu Inria Bordeaux Sud Ouest, le Musée de la Musique - Philharmonie de Paris, l'Institut Technologique Européen des Métiers de la Musique (ITEMM) du Mans et le Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France (C2RMF), a abouti à une procédure appliquée à la collection du musée Besson, qui fut un des principaux fabricants d'instruments à vent, et plus particulièrement à plusieurs trompettes naturelles datant du début du 20ème siècle. La géométrie des instruments a été mesurée de manière non invasive par tomographie à rayons X au C2RMF. Après avoir extrait leur perce (évolution du diamètre intérieur), leur impédance d'entrée a été calculée. Pour une trompette spécifique (E.0925), les données simulées ont été comparées aux mesures avec une excellente concordance. Malgré de nombreuses incertitudes sur la manière dont ces instruments ont été joués, des sons simulés peuvent être calculés. Un "fac-simile acoustique" de la trompette E.0925 a été fabriqué à partir des données de radiographie et d'impédance, et joué par un trompettiste professionnel. Cela permet de comparer les sons simulés avec les sons joués par un professionnel.

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

Super-absorption acoustique avec des bulles

V. Leroy

Laboratoire Matière et Systèmes Complexes, CNRS/Université Paris Cité
valentin.leroy@u-paris.fr

Une bulle d'air est un résonateur acoustique très basse fréquence ($\lambda/r=500$ dans l'eau), ce qui en fait une brique élémentaire de choix pour construire des métamatériaux acoustiques. On peut par exemple absorber de l'énergie acoustique avec un seul plan de bulles [1]. On parle alors de super-absorption parce que le milieu absorbant est efficace alors que son épaisseur est plus faible que la longueur d'onde.

La bulle présente également un intérêt du point de vue de la modélisation : c'est un diffuseur isotrope simple. Cela permet d'obtenir un modèle analytique du comportement du plan de bulles. La présentation montrera en particulier comment ce système acoustique est une parfaite illustration du concept de résonateur ouvert proposé par Bliock *et al.* pour expliquer des phénomènes optiques tels que la transmission extraordinaire [2].

- [1] V. Leroy *et al.*, "Superabsorption of acoustic waves with bubble metascreens", Phys. Rev. B (2015)
[2] K. Y. Bliokh *et al.*, "Unusual resonators: Plasmonics, metamaterials, and random media", Review of Modern Physics (2008)

Nitride nanostructured light emitting diodes

M. Tchernycheva

C2N-CNRS, University Paris Saclay, 91120 Palaiseau, France

Light emitting diodes (LEDs) are used in many applications including high-efficiency lighting. The existing limitations of thin film LEDs have motivated a strong research effort on nanostructured devices as a way to boost the performance, to reduce the cost or to bring new functionalities.

In this presentation, I will present our work on InGaN/GaN nanowire-based as well as nanoporous light emitting diodes. I will first discuss single nanowire properties and nanowire array LEDs on rigid substrates [1, 2, 3]. We use electron beam induced current microscopy and cathodoluminescence spectroscopy to detect failures and optimize the LED structure. Then I will focus on our recent progress toward flexible nitride nanowire devices. I will describe the approach for nanowire lift-off, transfer into polymer-embedded membranes and flexible contacting, which allows to combine high flexibility of

polymer films with high quantum efficiency provided by nitride nanowires. Realization and characterization of blue, green, two-color and white flexible light sources will be presented [4, 5, 6, 7]. I will also address an alternative approach to eliminate threading dislocation by nanoporosification and present nanoporous LEDs [8, 9].



Flexible green
InGaN/GaN NW
LED

- [1] M. Tchernycheva, V. Neplokh, H. Zhang, P. Lavenus, L. Rigutti, F. Bayle, F. H. Julien, A. Babichev, G. Jacopin, L. Largeau, R. Ciechonski, G. Vescovi and O. Kryliouk, “Core-shell InGaN/GaN nanowire light emitting diodes analyzed by electron beam induced current microscopy and cathodoluminescence mapping”, *Nanoscale* 7, 11692 (2015).
- [2] H. Zhang, G. Jacopin, V. Neplokh, L. Largeau, F. H. Julien, O. Kryliouk, M. Tchernycheva, “Color control of nanowire InGaN/GaN light emitting diodes by post-growth treatment”, *Nanotechnology*, 26, 465203A (2015).
- [3] H. Zhang, V. Piazza, V. Neplokh, N. Guan, F. Bayle, S. Collin, A. Babichev, F. H Julien, AM Tchernycheva, “Correlated optical and electrical analyses of inhomogeneous core/shell InGaN/GaN nanowire light emitting diodes”, *Nanotechnology* 32, 105202 (2021).
- [4] D. Xing, A. Messanvi, H. Zhang, C. Durand, J. Eymery, F. H. Julien, M. Tchernycheva, “Flexible Light Emitting Diodes Based on Vertical GaN Nanowires”, *Nano Letters* 15 (10), 6958 (2015).
- [5] N. Guan, X. Dai, A. Messanvi, H. Zhang, J. Yan, E. Gautier, C. Bougerol, F. H. Julien, C. Durand, J. Eymery and M. Tchernycheva, “Flexible White Light Emit-ting Diodes Based on Nitride Nanowires and Nanophosphors”, *ACS Photonics*, 3, 597 (2016).
- [6] N. Guan, N. Amador-Mendez, J. Wang, S. Das, A. Kapoor, F. H Julien, N. Gogneau, M. Foldyna, S. Som, J. Eymery, C. Durand and M. Tchernycheva « Colour optimization of phosphor-converted flexible nitride nanowire white light emitting diodes » *J. Phys.: Photonics* 1 (2019) 035003
- [7] N. Guan, N. Amador-Mendez, A. Kunti, A. Babichev, S. Das, A. Kapoor, N. Gogneau, J. Eymery, F. Henri Julien, C. Durand, M. Tchernycheva, “Heat dissipation in flexible nitride nanowire light-emitting diodes” *Nanomaterials* 10 (11), 2271 (2020)
- [8] N. Amador-Mendez, T. Mathieu-Pennober, S. Vézian, M-P Chauvat, M. Morales, P. Ruterana, A. Babichev, F. Bayle, F. H Julien, S. Bouchoule, S. Collin, B. Gil, N. Tappy, A. Fontcuberta i Morral, B. Damilano, M. Tchernycheva, “Porous nitride light-emitting diodes”, *ACS photonics* 9 (4), 1256-1263 (2022)
- [9] B Damilano, S Vézian, J Brault, P Ruterana, B Gil, M Tchernycheva “Nanoporous GaN by selective area sublimation through an epitaxial nanomask: AlN versus Si x N y” *Nanotechnology* 34 (24), 245602 (2023)

Modal Design of Interconnect-free Arithmetic and Logic Units in reconfigurable plasmonic cavities.

Erik Dujardin

*Lab. Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne, CNRS UMR 6303, Univ. de Bourgogne, 21000 Dijon.
 Erik.Dujardin@cnrs.fr*

Summary

We demonstrate a new concept of the design of all-optical elementary computing units based on the shaping of plasmonic modal landscape in micrometric on-chip 2D cavities to realize reconfigurable Arithmetic and Logic Units (ALU). Our interconnect-free optical devices perform multi-bit logic gate functions in a single cavity without ALU cascading, therefore obviating loss in vias and so the need for gain to restore the binary signal. Moreover, an astute cavity design allows to reconfigure a single cavity into multiple logic functions, including a first full adder. The main challenge on the way to increasing the functional Boolean complexity is the design of the cavity shape and of the excitation/detection parameters for which an approach based on artificial intelligence will be implemented.

1. Introduction

Processing information with conventional integrated circuits remains beset by the interconnect bottleneck: circuits made of smaller active devices need longer and narrower interconnects, which have become the prime source of power dissipation and clock rate saturation. Optical interchip communication provides a fast and energy-saving option that still misses a generic on-chip optical information processing by interconnect-free and reconfigurable Boolean arithmetic logic units (ALU). Considering metal plasmons as a platform with dual optical and electronic compatibilities, we forge interconnect-free, ultracompact plasmonic Boolean logic gates and reconfigure them, at will, into computing ALU without any redesign nor cascaded circuitry. As a starting point, we tailor the plasmon mode landscape of a single $2.6 \mu\text{m}^2$ planar gold cavity and demonstrate the operation and facile reconfiguration of all 2-input logic gates. In particular, we show that the critical XOR gate is achieved by harnessing the coherent multibit excitation of the cavity, which opens the way to the first arithmetic function, the 1-bit full adder.

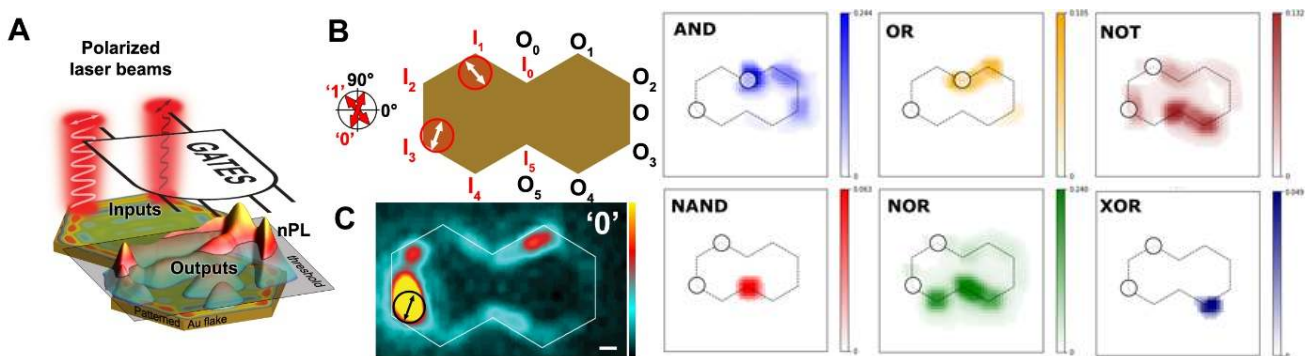


Fig. 1. (A) Schematic of a 2D crystalline gold cavity shaped into a double hexagon (DH) device (brown). Two laser beams, with specific linear polarizations that encode the Boolean “0” and “1” inputs, excite the device that produces a remote nonlinear photoluminescence (nPL) signal with strong spatial variations in the output region. A nPL signal exceeding a threshold value corresponds to a Boolean “1” gate output. (B) Locations of the DH device inputs and outputs. A two-beam excitation is exemplified for inputs I_1 and I_3 with input polarizations 130° (Boolean “1”) and 70° (Boolean “0”),

respectively. (C) Wide-field nPL image obtained by exciting the structure in I_3 with linearly polarized light oriented at 70° from horizontal. The map is the response function of the device to a Boolean “0” in input I_3 . [2] Right panels: Experimental Boolean contrast map for six different 2-input logic gates realized by reconfiguring the excitation conditions. The input ports are black circles. Adapted from [4]

2. Reconfigurable modal plasmonic logic gates and full adder ALU.

The general principle of plasmonic modal logic gate is illustrated in Figure 1. Surface plasmons (SPs) sustained by an ultrathin crystalline gold microplatelet are confined in a two-dimensional cavity that creates resonant SP modes. The resulting near-field patterns are distributed over the entire structure as a set of strongly contrasted localized and enhanced spots. To promote an optimal input–output information transfer, we focus here on a continuous double hexagonal shape (Figs. 1A,B) with a size adjusted to show transmittance resonances in the visible (720 nm) to near-IR (810 nm) region. [1,2]

Our devices are fabricated by focused ion beam (FIB) milling single-crystalline gold microplatelets produced in solution and drop-casted onto ITO-coated glass coverslips. The FIB nanofabrication leads to a standalone double hexagon with sharp edges and preserved crystallinity. The footprint of the structure is $2.65 \mu\text{m}^2$ (extremal size of $2.5 \times 1.1 \mu\text{m}$). When a femtosecond pulsed laser is focused on a near-field hotspot, it efficiently drives the plasmon resonance and generates nonlinear photoluminescence (nPL) not only at the excitation spot but also in the most remote regions of a specific near-field pattern (Fig. 1C).

In this work, the nPL is used as an all-optical observable of the transfer function of the device. Exploring the vast parametric space that includes the choice of input and output ports, the Boolean-encoding polarizations, the output threshold and the excitation wavelength, we demonstrate the implementation of all possible 2-input, 1-output logic gates and the agile reconfigurability of the DH device from one gate to another. Examples of experimentally demonstrated logic gate functions are shown in the right panel of Fig. 1.[2]

The XOR gate is a key element to ALU as it performs the binary addition of two bits. When combined with the AND gate, that corresponds to the carry function, the first arithmetic Boolean function, the full adder, can be envisioned. We will show the first experimental demonstration that the same DH cavity can be robustly driven to perform the 2-input, 2-output 1-bit full-adder ALU. This first proof-of-concept demonstrates that complex all-optical Boolean computing can be implemented in our compact interconnect-free plasmonic cavity without expanding its footprint. [3,4]

4. Conclusion

Further development towards more complex Boolean functions will require a better theoretical description of the near-field transduction into nPL and, more critically, a new paradigm for the design of the cavity shape and optimal excitation/detection configurations. A multi-objective evolutionary optimization approach does provide an efficient way of optimizing the driving parameters to operate the ALU. Yet the cavity shape remains the most challenging task in expanding the Boolean complexity of non-cascaded mono-block ALU as no rules are established that relates directly a chosen Boolean function to an optimal cavity shape.

6. Bibliographie

1. S. Viarbitskaya, et. al, E. Dujardin, *Nature Mater.* **12**, 426 (2013)
2. U. Kumar, et al., E. Dujardin, *ACS Photonics* **5**, 2328 (2018)
3. U. Kumar, et al., E. Dujardin, *ACS Nano*, **15**, 13351-13359 (2021).
4. F. Dell’Ova, et al., E. Dujardin, A. Bouhelier, *Opt. Exp.* **30**, 17517 (2022)
5. F. Dell’Ova, et al., A. Bouhelier, E. Dujardin, (2023) submitted for publication

GT3 – Capteurs, imagerie et inversion

Retour d'expérience de la mission spatiale SMOS au service de la co-conception de la future mission FRESCH

E. Anterrieu

CESBIO (UMR5126), 18 av. Edouard Belin, 31401 TOULOUSE cedex 9, FRANCE

Résumé.- On s'intéresse ici à un principe d'imagerie indirecte, la synthèse d'ouverture, et à son application à l'observation de la Terre depuis l'espace dans le domaine des micro-ondes. Il est illustré par la mission SMOS d'interférométrie passive de l'ESA et du CNES, opérationnelle depuis bientôt 14 ans, ainsi que par le projet FRESCH de successeur étudié par le CESBIO, le CNES et ADS, récemment soumis à l'ESA dans le cadre de l'appel EE12.



Figure 1. Vues d'artistes de SMOS (à gauche) et de FRESCH (à droite).

Une brève introduction illustrée du principe observationnel et du théorème de Van Cittert-Zernike s'achève sur le caractère mal conditionné du problème inverse à résoudre. On décrit ensuite de manière très concrète quelques méthodes de régularisation mises en œuvre pour la mission SMOS et on les situe dans la chaîne de traitement opérationnelle des données en comparant leurs avantages et leurs inconvénients respectifs. Dans une seconde partie, on montre comment la co-conception a conduit à un concept FRESCH aux objectifs ambitieux. Le modèle numérique d'instrument développé pour inverser les mesures interférométriques et restaurer la distribution des températures de brillance observée a été couplé à l'ensemble de la chaîne opérationnelle. Ce couplage a permis de valider les choix de paramètres instrumentaux au niveau des produits finaux. Sur le plan des méthodes, on montre l'influence des paramètres du modèle numérique d'instrument sur la stabilité des algorithmes de reconstruction mis en œuvre dans la chaîne de traitement. On s'attarde sur l'efficacité des simulations pour estimer la sensibilité des performances de la mission aux paramètres instrumentaux, aux pannes, aux erreurs et aux bruits, ainsi qu'aux différents traitements depuis les données brutes jusqu'aux produits finaux.

Bibliographie

- [1] E. Anterrieu, A resolving matrix approach for synthetic aperture imaging radiometers, *IEEE TGRS*, 42(8), pp. 1649-1656, Aug. 2004.
- [2] B. Picard and E. Anterrieu, Comparizon of regularized inversion methods in synthetic aperture imaging radiometry, *IEEE TGRS*, 43(2), pp. 218-224, Feb. 2005.
- [3] A. Khazâal, H. Carfantan and E. Anterrieu, *On the reduction of the systematic error in imaging radiometry by aperture synthesis: a new approach for the SMOS space mission*, *IEEE GRSL*, 6(1), pp. 47-51, Jan. 2009.
- [4] E. Anterrieu, P. Lafuma and N. Jeannin, *An algebraic comparison of synthetic aperture interferometry and digital beam forming in imaging radiometry*, *MDPI Remote Sensing*, 14(9), 2285, May 2022.

Co-conception optique/réseau de neurones appliquée à la 3D monoculaireP. Trouvé-Peloux¹, F. Champagnat¹, M. Dufraisse¹, J.-B. Volatier², R. Leroy¹, G. Druart²
G. Le Besnerais¹, J. Idier³¹ : DTIS-ONERA, Université Paris-Saclay, Palaiseau, France² : DOTA-ONERA, Université Paris-Saclay, Palaiseau, France³ : LS2N, UMR CNRS 6004, Centrale Nantes, Nantes, FrancePauline.trouve@onera.fr**Résumé**

Nous présentons les résultats de nos travaux portant sur la conception conjointe optique/traitement, ou co-conception, d'une caméra 3D monoculaire reposant sur l'estimation locale du flou de défocalisation dans une image. Nous commençons par les travaux de co-conception que nous avons menés basés sur des modèles de performance analytiques caractérisant la performance de la mesure 3D en fonction des paramètres optiques et traitement, puis nous présentons nos travaux récents impliquant un traitement par réseau de neurones et une approche d'optimisation basée données.

1. Introduction

Contrairement à la conception conventionnelle d'un système d'imagerie, où l'optique est optimisée séparément du traitement, la co-conception consiste à optimiser les paramètres des lentilles et du traitement ensemble pour obtenir un gain de performance de l'ensemble de la chaîne optique/traitement [Dowski1995]. Dans ce contexte, des éléments optiques non conventionnels, tels que les masques de phase diffractifs, les ouvertures codées ou les lentilles volontairement aberrantes, ont montré leur intérêt en co-conception. En effet, ces composants offrent des degrés de liberté supplémentaires pour contrôler la réponse impulsionnelle de l'optique (PSF), et peuvent lui donner des caractéristiques non conventionnelles pour une application spécifique, comme une invariance, pour l'extension de la profondeur de champ ou du champ de vision [Diaz2010, Burcklen2019, Fontbonne2021], ou au contraire une variabilité accrue, pour l'estimation de la profondeur [Levin2009, Trouvé2012]. Cependant, l'utilisation de ces composants optiques non conventionnels soulève la question de l'optimisation du système global optique/traitement, car les outils de conception optique traditionnels ne peuvent plus être utilisés. Dans l'état de l'art, des méthodes reposant sur des modèles de performances analytiques ont été proposées, mais des approches plus récentes basées données, incluant des traitements par réseau de neurones ont vu le jour plus récemment. Nous présentons ici nos travaux portant sur ces deux approches dans le cas particulier de l'optimisation d'une caméra monoculaire basée sur le flou de défocalisation.

2. Co-conception basée modèle

Pour mener à bien l'optimisation conjointe d'une optique et d'un traitement, des modèles de performance génériques, impliquant à la fois les paramètres de l'optique et du traitement, ont été proposés, généralement basés sur des outils de statistiques. A l'ONERA, dans le cadre de l'estimation de profondeur monoculaire, nous avons tout d'abord exploré l'intérêt de l'utilisation d'un objectif avec aberration chromatique, c'est-à-dire une variation spectrale de la distance focale de l'optique, pour améliorer la technique d'estimation de la profondeur reposant sur le flou de défocalisation, appelée *Depth from Defocus*. Après avoir développé un algorithme d'estimation locale du flou à partir d'une fenêtre de l'image basé sur une approche de maximum de vraisemblance, nous avons utilisé la borne de Cramér-Rao pour définir un critère de performance caractérisant la précision théorique de l'estimation de la profondeur, en fonction des paramètres optiques et traitement. En utilisant ce modèle, nous avons optimisé les paramètres d'une caméra 3D monoculaire, possédant une lentille chromatique. Cette caméra a été réalisée et validée [Trouvé2012, Trouvé2021].

3. Co-conception basée donnée

Comme dans de nombreux domaines, l'utilisation des réseaux de neurones a récemment révolutionné la co-conception pour de nombreuses applications, telles que l'extension de la profondeur de champ [Elmalem2018], l'extension du champ de vision [Liu2021] et l'estimation de la profondeur [Chang2019, Ikoma2021]. En effet, en utilisant un modèle optique capable de simuler la réponse impulsionnelle de l'optique de manière différentiable par rapport aux paramètres des lentilles, il est possible d'optimiser conjointement les paramètres de l'optique et ceux du réseau de neurones en utilisant des méthodes de descente de gradient. Nous appelons cette approche "deep co-design". Les premiers travaux dans ce domaine ont utilisé un modèle optique différentiable basé sur l'optique de Fourier [Elmalem2018, Chang2019] et ont optimisé des masques de phase ou des lentilles « freeform ». Cependant, ce modèle est basé sur une approximation paraxiale, donc il n'est valable que pour de petits champs de vue. De plus, ces travaux n'optimisent qu'un seul élément optique de l'objectif. Des modèles optiques plus complets pour le « deep co-design » basés sur le tracé de rayon différentiel (DRT) ont été proposés par des équipes internationales [Sun2021, Tseng2021] et à l'ONERA [Halé2021]. Les modèles optiques basés sur du DRT n'ont pas de limitation d'angle de champ et peuvent être utilisés pour optimiser l'ensemble des optiques d'un objectif. Plusieurs travaux sur le « deep co-design » pour la restauration d'images utilisant cet outil ont été réalisés à l'ONERA [Halé2021, Dufraisse2023], en particulier en combinant un modèle optique DRT avec un module de simulation d'images photoréalistes [Dufraisse2023]. Après avoir présenté ces travaux, nous discuterons de nos travaux actuels sur le « deep co-design » appliqué au cadre de l'estimation monoculaire de profondeur.

6. Bibliographie

- [Burcklen2018] M.A. Burcklen, "Conception conjointe de l'optique et du traitement pour l'optimisation des systèmes d'imagerie", thèse de doctorat, Université Paris-Saclay, 2018.
- [Chang2019] J. Chang et al., "Deep optics for monocular depth estimation and 3d object detection," In European Conference on Computer Vision, 2019.
- [Diaz2010] F. Diaz et al. "Comparison of depth of focus enhancing pupil masks based on a signal-to-noise ratio criterion after the deconvolution", J. Opt. Soc. Am. A 27, 2010.
- [Dowski1995] E. R. Dowski et W. T. Cathey, "Extended depth of field through wave-front coding," Appl. Opt. 34(11), 1995.
- [Dufraisse2023] M. Dufraisse et al., Deblur or denoise: the role of an aperture in lens and neural network co-design. Optics Letters, 48(2), 2023.
- [Elmalem2018] S. Elmalem et al., "Learned phase coded aperture for the benefit of depth of field extension," Opt. Express 26, 2018.
- [Fontbonne2021] A. Fontbonne et al., "Theoretical and experimental analysis of co-designed binary phase masks for enhancing the depth of field of panchromatic cameras", Opt. Engineering 60(3), 2021.
- [Ikoma2021] H. Ikoma et al., "Depth from Defocus with Learned Optics for Imaging and Occlusion-aware Depth Estimation", IEEE Int. Conf. on Computational Photography, 2021.
- [Levin2009] A. Levin et al. "Image and depth from a conventional camera with a coded aperture", SIGGRAPH, 2007.
- [Halé2021] A. Halé et al., "End-to-end sensor and neural network design using differential ray tracing. Optics express, 29(21), 2021.
- [Liu2021] Y. Liu et al., "End-to-end computational optics with a singlet lens for large depth-of-field imaging," Opt. Express 29, 2021.
- [Sun 2021] Q. Sun et al., End-to-End Complex Lens Design with Differentiate Ray Tracing, ACM Trans. Graph., 40 (4), 2021.
- [Trouvé2012] P. Trouvé, "Conception conjointe optique traitement pour imageur compact à capacité 3D", thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 2012.
- [Trouvé2021] P. Trouvé-Peloux et al., "Performance model of depth from defocus with an unconventional camera", JOSAA, 38, 2021
- [Tseng2021] E. Tseng et al. "Differentiable Compound Optics and Processing Pipeline Optimization for End-to-end Camera Design". SIGGRAPH, 2021.

**Du capteur à haute sensibilité à l'instrumentation aux limites
dans un monde de mesures, massifié et hyperconnecté.**

Christophe DOLABDJIAN
GREYC - UNICAEN – ENSICAEN - CNRS UMR6072
christophe.dolabdjian@unicaen.fr

Résumé

Cette contribution vise à présenter l'état de l'art des développements dans le domaine de la mesure des champs magnétiques et, dans une moindre mesure, des champs électriques. Une revue des performances de cesdits capteurs « à haute sensibilité » et d'applications dans le domaine sera présentée sur la base de publications et de travaux menés au GREYC. Au-delà des performances, l'approche systémique dans la qualification des systèmes développés sera illustrée. Les problématiques de la mesure à l'aide de capteurs dits intelligents, connectés et communicants seront abordées. Les principaux enjeux actuels et futurs associés aux développements de technologies « anciennes » ou « plus récentes » seront également exposés afin d'apporter des éléments de réflexion sur les recherches et les perspectives dans le domaine.

1. Introduction

Le développement de capteurs de champ magnétique à très haute sensibilité, et dans une moindre mesure de champ électrique, demeure un sujet d'actualité, comme le montrent un bon nombre d'études et de nombreuses publications portant d'une part sur la réalisation d'éléments sensibles et d'autre part sur leurs mises en œuvre dans le cadre de diverses applications, pour certaines originales [1, 2]. L'amélioration continue des performances de ces dispositifs ou une réappropriation de savoirs [3] sont les enjeux majeurs dans un certain nombre de domaines. Ces recherches portent notamment sur la réduction des niveaux de densité spectrale de bruit équivalent en champ aux basses fréquences, l'élargissement de la plage de fréquence, l'accroissement de la dynamique de mesure, l'amélioration de la stabilité ou la réduction des dérives à long terme, le développement de SiP (System in a Package) ou SoC (System on a Chip) [4], la réduction de la consommation tout en conservant d'excellentes performances, etc. Néanmoins, ces performances/problématiques doivent être menées/étudiées avec rigueur afin de comparer raisonnablement ces diverses technologies ou dispositifs. Ces dernières années, il est apparu de nouvelles orientations en termes de recherche, notamment, sur des dispositifs que nous pourrions qualifier de « tout quantique » [5]. Néanmoins, les contraintes dans la mise en œuvre de ces systèmes dans un environnement réel perdurent et ne peuvent être occultées dans l'évaluation des "réelles" performances accessibles.

Ainsi, une comparaison rigoureuse des performances à l'état de l'art, de ce que nous pourrions qualifier d'anciennes et nouvelles technologies, doit être menée. Cette présentation permettra de rappeler, dans une certaine mesure, l'importance d'une approche systémique ou mécatronique dans ces analyses afin d'évaluer rigoureusement les attendus en termes de performances, tout en tenant compte des problématiques ou de la complexité associés à la mesure visée.

6. Bibliographie

- [1] H. Korth, J. Kitching, J. Bonnell, B. Bryce, G. Clark, W. Edens, C. Gardner, W. Rachelson, A. Slagle, Flight demonstration of a miniature atomic scalar magnetometer based on a microfabricated rubidium vapor cell, *Rev. Sci. Instrum.* 94, 035002 (2023)
- [2] <https://bellwaldtec.ch/>
- [3] D. Miles, M. Ciurzynski, D. Barona, B. Narod, J. Bennest, A. Kale, M. Lessard, D. Milling, J. Larson and I Mann, Low-noise permalloy ring cores for fluxgate magnetometers, *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.*, 8, 227–240, 2019
- [4] B. Brajon, E. Gasparin, G. Close, A Benchmark of Integrated Magnetometers and Magnetic Gradiometers, *IEEE Access*, Sept. 2023
- [5] C. L. Degen, F. Reinhard, and P. Cappellaro, Quantum sensing, *Rev. Mod. Phys.* 89, 035002(2017)

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

Combiner harmonieusement les antennes dans un système de communication : Revue des défis pour la 5 et 6G

Jean-Baptiste Doré¹

¹ : *CEA-Leti, Grenoble*
jean-baptiste.dore@cea.fr

Dans cette présentation, nous esquisserons dans une première partie l'état des réflexions de la communauté sur la 6G avec un focus sur les bandes de fréquences et leurs applications envisagées. Dans une seconde partie, nous nous focaliserons sur le spectre millimétrique. Nous montrerons, à travers des exemples concrets, comment réfléchir conjointement un système antenne (i.e rayonnant), incluant les surfaces reconfigurables intelligentes, avec son système, front end RF et/ou algorithmes de traitement de signal. Des exemples autour de la bande 5G millimétrique et du spectre au-delà de 100GHz seront donnés.

Cet exposé regroupera les dernières avancées du CEA Leti incluant des contributions des laboratoires traitement du signal, conception de circuit et antennes et propagation et les laboratoires du département micro-électronique.

Tendances actuelles dans la fabrication additive de composants passifs microondes

Nicolas Delhote¹

¹ : *Xlim, Limoges*

nicolas.delhote@xlim.fr

Cette présentation s'attachera à illustrer, après de nombreuses années de mise en pratique sur des composants microondes passifs, l'utilisation actuelle et les tendances futures des technologies de fabrication additive.

Ce sujet couvrira l'utilisation de différents matériaux diélectriques et conducteurs en s'appuyant sur des exemples conçus dans le laboratoire Xlim.

Les métamatériaux au service des transports et de la ville de demain

Divitha Seetharamdoo

Laboratoire COSYS-LEOST, Université Gustave Eiffel, Campus de Lille

F-59 650 Villeneuve d'Ascq, France.

divitha.seetharamdoo@univ-eiffel.fr

Dans cette présentation, nous aborderons l'application des métamatériaux aux dispositifs micro-ondes au service des transports et de la ville de demain au travers des résultats de travaux de recherche menés au laboratoire LEOST.

Les résultats présentés se situent à l'intersection des besoins actuels de la transition énergétique (augmentation de la mobilité douce, de l'attractivité du ferroviaire, réseaux de capteurs urbains...) et des recherches récentes en métamatériaux. Nous présenterons en particulier l'utilisation des métamatériaux rétro réfléchissants pour accroître la surface équivalente radar des usagers vulnérables, réaliser une récupération d'énergie ainsi que l'intégration d'antennes.

GT5 – Compatibilité électromagnétique

La susceptibilité électromagnétique : de la fonction électronique à la fonction opérationnelle

Patrick Hoffmann¹

¹ : CEA, DAM, CEA-Gramat, F- 46500 Gramat, France
Email patrick.hoffmann@cea.fr

Résumé

Nous présentons la démarche méthodologique en cours de développement au CEA – Gramat pour déterminer l'effet induit par des agressions électromagnétiques intentionnelles sur les systèmes électroniques en s'appuyant sur des études de susceptibilité réalisées sur des chaînes de réception radiofréquence et sur des équipements numériques.

1. Introduction

Le terme de susceptibilité fut introduit dans le langage scientifique en tant que réponse d'un système à une faible perturbation, ce qu'on regroupait sous l'expression de théorie de la réponse linéaire. C'est dans ce sens que perdure les notions de susceptibilité électrique et magnétique. Mais progressivement, les termes de réponse ou de fonction de transfert se sont substitués au terme de susceptibilité, reléguant ce dernier au sens de réaction imprévue d'un système à une sollicitation extérieure. La présentation explorera les voies expérimentales et théoriques actuellement en développement pour établir les relations entre susceptibilité physique et effet fonctionnel singulier (cf. Figure 1).

2. La susceptibilité : une cause physique, un effet fonctionnel

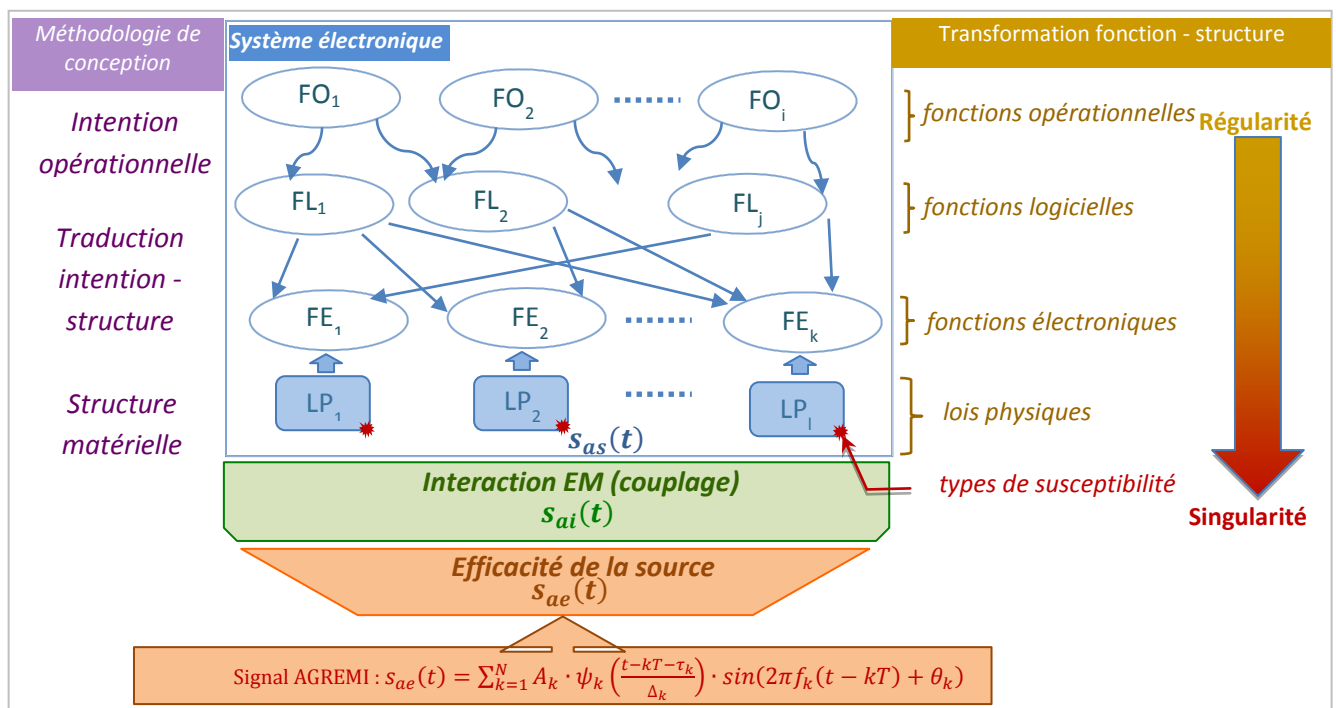


Figure 1: Place de la susceptibilité dans la topologie d'un système électronique

La présentation s'appuiera sur deux types de susceptibilité dont l'origine physique a été caractérisée : la destruction des amplificateurs faible bruit des chaînes de réception RF et la détection active des composants numériques. A partir de ces deux types, nous examinerons les différentes démarches en cours pour établir le lien entre fonction et susceptibilité.

La VIRC : un moyen d'essai électromagnétique 2-en-1

G. Andrieu¹

¹ : Laboratoire XLIM, UMR 7252, Université de Limoges, France

Résumé

Proposées au début des années 2000 par Frank Leferink (Thales Netherlands) [1], les chambres réverbérantes vibrantes (VIRC) sont des chambres réverbérantes (CR) constituées d'une tente métallisée flexible. Grâce à de forts avantages structurels (moyen d'essai faible coût, démontable, déplaçable vers le dispositif à tester), l'utilisation des VIRCs est actuellement en plein essor.

La présentation plénière tentera de montrer d'une part que les VIRCs, en particulier si elles sont correctement conçues et si le brassage de modes permettant le mouvement de la toile au cours du temps est efficace [2], peuvent pour de nombreuses applications surpasser l'efficacité des CR « classiques » constituées de cavités métalliques parallélépipédiques. On pense ici en particulier à une incertitude de mesure très faible (liée à un nombre d'échantillons indépendants collectés très important) associée à un temps de mesure également réduit.

D'autre part, la réalisation d'un brassage de modes permettant d'agiter chaque point de la toile (y compris le sol) permet d'annuler drastiquement l'amplitude des trajets non brassés au sein de la VIRC et ainsi d'obtenir une cavité parfaitement « chaotique » [3]. Ces conditions ouvrent alors la voie à des mesures de type « anéchoïques » (diagramme de rayonnement d'antennes par exemple [4]) à l'aide d'un simple moyennage des acquisitions.

On assiste alors à l'apparition du **premier moyen d'essai électromagnétique 2-en-1** capable de réaliser à la fois des essais de type anéchoïque (au prix d'un moyennage des acquisitions) et réverbérant.



Figure 1. Photographie de la VIRC surélevée par rapport au sol installée au CRT Cisteme (Limoges)

Bibliographie

- [1] F. Leferink, Patent NL1010745, Test Chamber, Dec. 7, 1998.
- [2] Y. Rammal et al., "Stirring Process Optimization of a Vibrating Intrinsic Reverberation Chamber using Scattering Parameter Measurements," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, accessible en early access sur IEEEXplore.
- [3] G. Andrieu et al., "On the Cancellation of Unstirred Paths in a Fully Stirred VIRC Working as a Perfect Chaotic Reverberation Chamber," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 71, no. 11, pp. 8871-8880, Nov. 2023.
- [4] Y. Rammal et al., "Antenna Radiation Pattern Measurements in a Perfectly Chaotic VIRC," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, soumis en octobre 2023.

Menaces Electro-Magnétiques : les nouveaux enjeux émergents d'une aviation décarbonée

Franck Flourens

Airbus – Avions Commerciaux
franck.flourens@airbus.com

La communauté industrielle en charge de la protection des aéronefs aux menaces électromagnétiques de toute nature (Foudre, EMI/EMC, HIRF, ESD ...) efficacement supportée par une communauté académique et des laboratoires très actifs sur ces sujets a réussi à surmonter de nombreux défis au cours des deux dernières décennies. L'aboutissement dans le domaine civil se matérialise dans la dernière génération de véhicules aériens. Le recours massif aux matériaux composites ou l'intégration de fonctions de contrôle plus automatisées, avec des interdépendances complexes et une intégration poussée des ressources matérielles sont de bons exemples sans être exhaustifs. La question abordée dans cette discussion concerne le prochain chapitre !

Quels sont les prochains défis et opportunités que devra relever la communauté EMH* dans les vingt prochaines années ?

L'évolution des plateformes aéronautiques est dictée par deux moteurs incontestables que sont la sécurité et l'efficacité opérationnelle. Ces dernières années, les fabricants ont commencé à prendre en compte un troisième facteur, désormais pleinement intégré à l'analyse globale des performances des produits : l'empreinte environnementale. La première façon de réduire cette empreinte à court terme consiste à réduire la consommation de carburant, tout en offrant un avantage économique. Les évolutions aérodynamiques, l'efficacité de la propulsion, les gains de masse et la gestion du vol sont des facteurs sur lequel il est possible d'agir dès aujourd'hui, autour d'un concept traditionnel d'amélioration continue. Bien que cette évolution reste assez conventionnelle, la prise en compte efficace de la protection EMH sur des cycles de développement courts oblige à des évolutions d'ordre méthodologique (eg simulation) et normatif.

Le recours à de nouvelles technologies (électrification, propulsion hybride, carburants synthétiques, H2...), à de nouveaux modes d'exploitation (par exemple le vol en formation, les conditions météorologiques prédictives...), complété par des matériaux et procédés éliminant les substances nocives (cadmiage, composés organiques volatils...), ou biosourcés (bio-composites) doit permettre de faire le pas décisif pour une aviation durable. Étonnamment, l'émergence de ces nouvelles technologies permet également de développer des concepts complètement nouveaux de véhicules aériens commerciaux (VTOL, UAM...) apportant leurs propres problématiques spécifiques. Au-delà de ces évolutions technologiques, la transformation des processus de développement industriel permise par la digitalisation massive suggère d'adapter les approches conventionnelles de conception et de V&V utilisées pour la protection EMH en profitant des nouvelles méthodes d'ingénierie système (Model Based, boucles de convergence multi-partenaires -méthodes d'optimisation multi-disciplinaire).

L'ensemble de la communauté de la protection contre les menaces électromagnétiques doit faire partie de ce voyage en comprenant d'abord les implications potentielles de ces changements et des technologies cibles, puis en mettant en place l'infrastructure méthodologique nécessaire soutenue par des normes, des documents d'orientation et des moyens de simulation adéquats. L'exposé mettra en lumière quelques domaines d'investigations et d'orientations à l'aide d'exemples pour lesquels la maîtrise de certains aspects de la protection EMH, sera un facteur décisif de réussite.

Remerciements

Je remercie particulièrement les organisateurs de la conférence pour m'avoir donné l'opportunité de porter cette discussion dans la communauté CEM.

**EMH : Electro-Magnetic Hazards*

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

Approches RF pour interroger les phénomènes de (dé)-polarisation spatiale lumineuse à l'échelle du grain de speckle

Jonathan Staes¹, Julien Fade^{1,2}

¹ : Univ Rennes, CNRS, Institut FOTON, 263 av. Général Leclerc, 35 042 Rennes, France

² : Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Méditerranée, Institut Fresnel, Marseille, France
Email julien.fade@fresnel.fr

Résumé: Nous présentons comment l'utilisation d'une source laser bi-fréquence bi-polarisation permet, grâce à des approches de mesure inspirées d'optique-hyperfréquence, de réaliser une imagerie polarimétrique originale d'un champ de speckle ultrarésolu, et d'apporter un éclairage nouveau sur les phénomènes de dépolarisation spatiale et de « repolarisation » par un milieu diffusant.

1. Introduction

L'étude du processus de dépolarisation à l'échelle du grain de speckle observable en lumière cohérente reste un sujet d'étude actuel, avec de nombreux travaux expérimentaux récents. La plupart de ces travaux s'intéressent au mécanisme de dépolarisation graduelle (spatiale) à l'échelle des grains de speckle d'un faisceau laser polarisé. Des analyses similaires peuvent être conduites avec une illumination différente (moins cohérente, moins polarisée, voire dépolarisée, etc.) et peuvent permettre d'étudier d'autres phénomènes polarimétriques intéressants, tel que le phénomène dit de "repolarisation", qui consiste en l'observation d'un accroissement du degré de polarisation moyen d'une lumière initialement très dépolarisée lors de l'interaction avec un matériau diffusant et dépolarisant [1,2].

Grâce à un banc de polarimétrie de Stokes résolu à l'échelle du grain de speckle [3], adapté pour le doter d'une modalité d'acquisition d'image de polarimétrie par brisure d'orthogonalité (BO) [4], nous avons réalisé ces expériences avec une source bi-fréquence, bi-polarisation linéaires orthogonales, dont le comportement moyen vu par la caméra est équivalent à un éclairage parfaitement dépolarisé. Cette illumination nous permet de réaliser des cartographies de l'état de polarisation d'un champ de speckle résolu sous 3 illuminations différentes : (i) polarisation linéaire horizontale, (ii) verticale, et (iii) dépolarisée (somme de deux polarisations orthogonales, et décalées en fréquence), ainsi que (iv) une mesure d'imagerie de BO.

La comparaison des cartographies d'état de polarisation et de degré de polarisation obtenues dans les 3 premières modalités d'imagerie de Stokes et de la cartographie du battement observé dans les grains de speckle permet d'apporter un éclairage nouveau sur les phénomènes de repolarisation par un milieu diffusant. Les résultats obtenus démontrent en effet que les phénomènes de repolarisation proviennent de l'interaction localement constructive de deux composantes incohérentes du champ, polarisées dans des directions distinctes, et permettent d'expliquer quantitativement les distributions de degré de polarisation dans ces expériences [2].

2. Bibliographie

- [1] R. Barakat, "Polarization entropy transfer and relative polarization entropy," *Optics comm.*, 123, 1996.
- [2] J. Sorrentini, et al., "Enpolarization of light by scattering media," *Optics Express*, 19, pp. 21313–21320, 2011.
- [3] L. Pouget, J. Fade, C. Hamel, and M. Alouini, "Polarimetric imaging beyond the speckle grain scale," *Appl. Opt.*, 51, 2012.
- [4] J. Fade et M. Alouini, "Depolarization remote sensing by orthogonality breaking," *Phys. Rev. Lett.*, 109, (2012).

Etats sans réflexion dans les milieux désordonnés

Matthieu Davy¹

¹ : Univ. Rennes, CNRS, IETR (Institut d'Electronique et des Technologies du numéRique), UMR–6164, F–35000 Rennes, France,
Email matthieu.davy@univ-rennes.fr

Résumé

Alors qu'une onde illuminant une structure désordonnée est partiellement réfléchiée en raison de la diffusion dans le milieu, les états sans réflexion excitants permettent de supprimer complètement cette réflexion. Dans cet exposé, nous observons d'abord l'existence de points exceptionnels sans réflexion obtenus dans des milieux symétriques. Ensuite, nous montrons qu'il est possible de concevoir des structures antiréflexion afin d'obtenir une transmission parfaite à travers un milieu désordonné pour tout front d'onde incident. Enfin nous nous intéressons au phénomène de diffusion virtuellement sans réflexion grâce à une approche temporelle qui permet de sculpter de manière optimale un front d'onde d'entrée à la fois dans l'espace et dans le temps pour toute fonctionnalité de contrôle d'onde souhaitée.

1. Travaux présentés

La transmission d'ondes dans des milieux désordonnés est généralement entravée par des diffusions multiples au sein du milieu. La transmission moyenne est faible lorsque la longueur de l'échantillon est beaucoup plus grande que le libre parcours moyen de transport. Cependant, comme l'illustre l'existence de canaux ouverts avec une transmission parfaite, il est possible de trouver des états d'absence de réflexion à l'entrée à des fréquences spécifiques, même dans des milieux aléatoires. Nous examinerons tout d'abord le concept des états sans réflexion (RL) qui sont des fonctions propres d'un opérateur non hermitien basé sur l'équation d'onde avec des canaux entrants modélisés par un gain et des canaux sortants par des pertes. Lorsqu'une valeur propre RL est accordée sur l'axe réel, on obtient un état avec zéro réflexion et donc une transmission parfaite dans les échantillons non absorbants. Dans les échantillons symétriques, l'opérateur RL est symétrique par rapport au temps de parité, ce qui conduit à l'existence de points exceptionnels RL où deux états propres RL coalescent. Nous observons ces points exceptionnels expérimentalement dans des systèmes Fabry-Perot multi-miroirs [1] et dans des structures symétriques complexes.

Ensuite, nous montrerons que la transmission à travers un obstacle peut être grandement améliorée en positionnant de nouveaux éléments de diffusion devant ou derrière celui-ci. Un milieu sans corrélation apparente peut être rendu entièrement transmissible à tous les fronts d'onde entrants à une seule fréquence en plaçant un milieu complémentaire personnalisé devant lui [2]. La conception d'une telle structure anti-réflexion exige que le désordre initial fixe et la structure optimisée satisfassent une condition de couplage critique généralisée. La conception de la structure anti-reflet est réalisée numériquement et les résultats sont vérifiés expérimentalement. Nous rendons les guides d'ondes électromagnétiques entièrement transmetteurs malgré la présence de plusieurs dizaines d'éléments diffuseurs à l'intérieur.

Enfin, nous discuterons un nouveau formalisme matriciel spatio-temporel qui permet d'optimiser une fonctionnalité arbitraire du contrôle des ondes à partir de la décomposition en valeurs singulières d'un nouvel opérateur basé sur la matrice de diffusion multispectrale [3]. Ce formalisme est appliqué à l'excitation transitoire sans réflexion ("absorption virtuelle parfaite"), à la focalisation optimale de l'énergie à un moment ciblé, et finalement à l'excitation d'états invariants de diffusion dans le temps.

L'ensemble de ces travaux seront illustrés par des réalisations expérimentales conduites dans le domaine des micro-ondes (entre 6 et 15 GHz) dans des guides d'ondes multimodes ainsi que dans des cavités désordonnées.

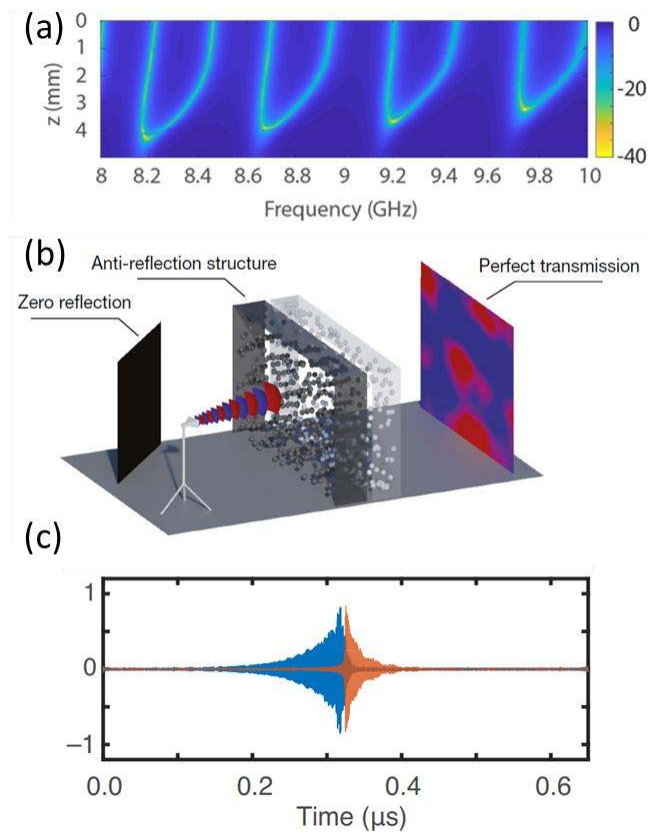


Figure 1. (a) coalescence d'états sans réflexion aux points exceptionnels dans une cavité Fabry-Perot multimiroirs, (b) conception de structures anti-réflexion pour les milieux complexes, (c) état virtuel sans absorption au sein d'une cavité chaotique. Durant la phase d'excitation la réflexion est nulle.

2. Bibliographie

- [1] C. Ferise, P. Del Hougne, S. Félix, V. Pagneux, and M. Davy, "Exceptional Points of PT-Symmetric Reflectionless States in Complex Scattering Systems," *Physical Review Letters*, vol. 128, p. 203904, 2022
- [2] M. Horodyski, M. Kühmayer, C. Ferise, S. Rotter, and M. Davy, "Anti-reflection structure for perfect transmission through complex media," *Nature*, vol. 607, pp. 281-286, 2022/07/01 2022.
- [3] Ferise, C., del Hougne, P. & Davy, M. Optimal matrix-based spatiotemporal wave control for virtual perfect absorption, energy deposition, and scattering-invariant modes in disordered systems. *Phys. Rev. Appl.* 20, 054023 (2023).

Diffusion multiple des ultrasons dans les matériaux granulaires et renversement du temps

A. Tourin¹, Y. A. Fernandes^{1,2}, A. Le Ber¹, B. A. Van Tiggelen³, N. Benech², C. Negreira², X. Jia¹

¹ : Institut Langevin, Université PSL, ESPCI Paris, CNRS, Paris, France

² : Laboratorio de Acustica Ultrasonora, Instituto de Fisica, Facultad de Ciencias, UdelaR,
Montevideo, Uruguay

³ : Univ. Grenoble Alpes, CNRS, LP2MC, Grenoble, France

arnaud.tourin@espci.psl.eu

Résumé

L'onde ultrasonore transmise à travers un milieu granulaire, qu'il soit sec ou immergé, se compose d'une onde cohérente basse fréquence suivie d'ondes multiples diffusées à plus haute fréquence. Nous montrons que la focalisation par retournement temporel des ondes diffusées peut être exploitée pour déclencher un réarrangement contrôlé dans un matériau granulaire sec. Dans le cas d'un matériau granulaire immergé, une expérience du même type permet d'accéder au coefficient de diffusion.

1. Introduction

Les matériaux granulaires sont des assemblages de grains macroscopiques maintenus en contact par la gravité ou par une contrainte qui leur est appliquée [1,2]. Ils sont omniprésents dans notre environnement (plages de sable, dunes, éboulements rocheux, failles sismiques) et interviennent dans de nombreuses applications, en particulier dans les industries pharmaceutique (poudres à la base de la fabrication de médicaments) et alimentaire (céréales) et dans le génie civil (béton, asphalte, remblais, ballasts). La taille des grains est typiquement supérieure à 1 μm si bien que l'agitation thermique ne joue pas de rôle dans la physique de ces matériaux. Les forces adhésives entre grains, telles que les forces de van der Waals et les forces capillaires dues à l'humidité, ne jouent quant à elle un rôle que pour des tailles de grains inférieures à 10 μm .

Ces milieux peuvent se trouver dans les différents états physiques selon les conditions aux limites et les sollicitations extérieures. Un tas de sable au repos sous gravité est à l'état solide. Mais dès que l'on incline un milieu granulaire au-delà d'un angle critique, il commence à s'écouler comme un liquide. Enfin, quand un milieu granulaire est mis sous forte vibration, il peut se comporter comme un gaz.

La compréhension de la physique des matériaux granulaires denses et, en particulier, des conditions de déclenchement de la transition solide/liquide est encore très incomplète. Dans ce contexte, les ondes élastiques peuvent être avantageusement mises à profit comme sonde de ces matériaux, mais aussi comme un moyen d'y induire des instabilités pouvant conduire à la rupture.

2. Systèmes expérimentaux étudiés

Les ultrasons peuvent être utilisés comme une sonde non intrusive d'un matériau granulaire sec (Fig. 1a) ou d'un matériau granulaire immergé (Fig. 1c).

3. Résultats

Nous mettons en évidence l'existence d'une onde cohérente basse fréquence dans le signal transmis à travers les deux milieux étudiés (Fig. 1b et Fig. 1d). Si celle-ci était connue depuis longtemps dans le cas de matériaux granulaires secs [3], c'est en revanche la première fois qu'elle est observée dans le cas d'un matériau granulaire immergé [4].

Dans les deux cas, l'onde cohérente est suivie d'ondes multiples diffusées à plus haute fréquence. Dans une expérience de retournement temporel, celles-ci peuvent être refocalisées sur la source [5]. Dans le cas d'un matériau granulaire sec, une telle expérience peut être exploitée pour apprendre à y induire des réarrangements contrôlés. Lorsque le Miroir à Retournement Temporel (MRT) est positionné au sein d'un matériau granulaire immergé tandis que la source est placée à l'extérieur, nous montrerons que le suivi de la

tache focale, en fonction de la position de la fenêtre de retournement temporel dans le signal diffusé, nous donne accès au coefficient de diffusion.

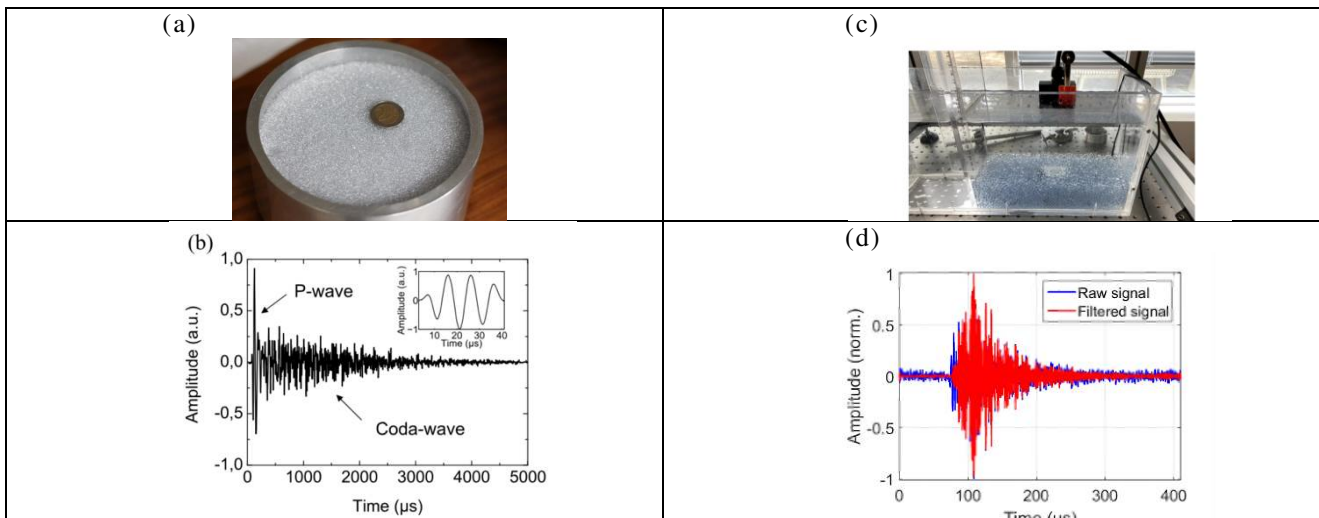


Figure 1.a : matériau granulaire sec composé de billes de verre de diamètre 1.5 mm. Figure 1b : allure du signal transmis pour un signal émis consistant en trois cycles de sinusoïde de fréquence centrale 100kHz. Figure 1c : le même matériau est immergé dans l'eau. Figure 1d : Allure du signal transmis pour un signal émis consistant en quatre cycles de sinusoïde de fréquence centrale 2MHz.

4. Conclusion

Pour les ultrasons, les matériaux granulaires sont des milieux multiples diffuseurs d'un type particulier. Qu'il s'agisse d'un matériau granulaire sec ou bien immergé, le signal transmis se compose d'une onde cohérente basse fréquence suivie d'ondes multiples diffusées de plus haute fréquence. En complément des méthodes traditionnellement utilisées pour mesurer les paramètres de transport (rétrodiffusion cohérente, courbe de distribution des temps de vol), le coefficient de diffusion peut être mesuré via le suivi temporel de la tache de focalisation obtenue dans une expérience de retournement temporel où le MRT est positionné au sein du matériau granulaire immergé. La focalisation par retournement temporel peut également être utilisée pour générer, à distance, un réarrangement contrôlé dans un matériau granulaire sec.

6. Bibliographie

- [1] H. M. Jaeger, S.R. Nagel and R.P. Behringer, Granular solids, liquids and gases, *Rev. Mod. Phys.*, vol. **68**, pp. 1259-1273, 1996.
- [2] B. Andreotti, Y. Forterre, O. Pouliquen, *Les Milieux Granulaires Entre Fluide Et Solide*, EDP Sciences, 2011.
- [3] X. Jia, C. Caroli, and B. Velicky, Ultrasound propagation in externally stressed granular media, *Phys. Rev. Lett.*, vol. **82**, pp. 1863, 1999.
- [4] JH Page, HP Schriemer, AE Bailey, and DA Weitz, Experimental test of the diffusion approximation, *Phys. Rev. E*, vol. **52**, pp. 3106, 1995.
- [5] M. Harazi, Y. Yang, M. Fink, A. Tourin, X. Jia, Time reversal of ultrasound in granular media, *Eur. Phys. J. Special Topics*, vol. **226**, pp. 1487, 2017.

Club des partenaires

L'innovation Spatiale au service de la défense

Anthony Bellion¹

¹ : Centre National d'Etudes Spatiales (CNES),
Anthony.bellion@cnes.fr

Résumé

« Dans un monde en proie à des menaces vives, imprévisibles, technologiques, alors que les puissances cherchent à s'affirmer, l'espace est aujourd'hui une clé de voûte de notre défense. Anticiper et planifier les manœuvres, repérer l'ennemi, guider nos forces sur le terrain et communiquer, plus une seule de nos opérations ne peut se passer de nos capacités spatiales [...]. L'irruption des méthodes d'innovation de rupture dans le secteur spatial [...] appelle un changement de méthode dans notre façon d'appréhender le développement de nos capacités spatiales. [...]

*Au Sein de Direction Technique et du Numérique (DTN) du CNES, la sous-direction des Techniques et Performances des Instruments (TPI) a pour objectifs la **maîtrise et la performance de la chaîne instrumentale et des signaux sur l'ensemble du spectre : hautes énergies, optique, et radiofréquences.***

Dans le cadre des activités mentionnées précédemment, le CNES intervient : en support au MINARM sur les missions spatiales majeures ; sur les gros programmes de R&D pour les futures capacités spatiales ; en guide et soutien au nouvel écosystème industriel ; avec un niveau d'implication ciblée en fonction de la plus-value. »

Simulations Radar de la Conception aux Performances Système pour l'Aérospatiale et la Défense

A. Moknache¹

¹ : ANSYS France

amazir.moknache@ansys.com

Cette présentation explore de manière approfondie le processus de conception, simulation et évaluation des performances des radars, avec un accent particulier sur les applications cruciales dans le domaine de l'aérospatiale et de la défense. Nous montrerons comment l'outil High-Frequency Structure Simulator (HFSS) sert de pierre angulaire dans la conception et l'optimisation des radars, en offrant des capacités avancées pour explorer les simulations électromagnétiques. Nous montrant également une approche de couplage multi-physique électro-thermo-mécanique et nous illustrerons comment les simulations permettent de modéliser et d'analyser les performances des radars dans des conditions réalistes. Nous aborderons les défis liés à l'intégration de ces radars sur des plateformes, en examinant les perturbations engendrées et les stratégies pour les atténuer.

Enfin, la présentation mettra en lumière la simulation des performances système du radar, en exploitant des solveurs rapides de type lancés de rayons. Les résultats obtenus, tels que les images de type Range Profile, Doppler Range, et ISAR, serviront de base pour évaluer la fonctionnalité globale du système radar. Ces simulations systèmes peuvent être faites dans l'environnement ouvert « Open loop » HFSS mais aussi dans notre outil de simulation mission « Systems Tool Kit (STK) » « Close loop ». En intégrant STK dans le processus de simulation, nous pourrions évaluer le comportement du radar dans le contexte opérationnel, en prenant en compte des variables telles que la géolocalisation, la trajectoire des cibles et les contraintes environnementales. Cette approche enrichit considérablement l'analyse des performances système du radar et son impact opérationnel.

En conclusion, cette approche intégrée, combinant HFSS et STK, fournit des perspectives avancées pour concevoir des systèmes radar robustes, résilients et performants, répondant aux exigences rigoureuses de l'aérospatiale et de la défense.

JCAS for 6G Application

C. Fombonne¹, Karim Louertani¹

¹ : *Rohde & Schwarz France*

cyril.fombonne@rohde-schwarz.com, karim.louertani@rohde-schwarz.com

La technologie JCAS/ICAS (Joint or integrated communication and sensing) est l'un des grands axes de recherche dans le domaine de la 6G. Cette technologie permet d'améliorer les applications existantes et de développer de nouveaux cas d'utilisation en alliant les technologies de communication avec la détection de l'environnement. Il devient notamment possible d'utiliser un signal de communication 5G afin de détecter, suivre et identifier une cible ou son environnement pour assurer l'interconnexion entre les équipements de communication et améliorer les performances du système. Pour illustrer cette technologie, un émulateur de canal AREG800A est utilisé pour simuler un objet entre un émetteur et un récepteur de signaux 5G dans la bande 24 à 44 GHz. A l'issue du post-traitement des signaux envoyés et reçus, la distance ainsi que la vitesse sont déterminées et actualisées en fonction des paramètres de la cible. JCAS ouvre ainsi la porte à un large éventail de cas d'utilisation polyvalents et passionnants.

Posters GT1

Explicit modelling and optimisation of acoustic meta-lenses for baffled sources

T. Cavalieri¹, V. Romero-Garcia¹, M. Melon¹, J.-C. Chamard², J.-P. Groby¹

¹: Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Mans, UMR 6613, Institut d'Acoustique Graduate School, CNRS, Le Mans Université, Avenue Olivier Messiaen, 72075 Le Mans, France

²: Stellantis, Centre Technique Vélizy, Route de Gisy, 78943 Vélizy-Villacoublay Cedex, France
Theo.Cavalieri@univ-lemans.fr

Abstract

This study introduces a novel approach for steering and focusing acoustic beams in personalized sound zone applications. The present work involves employing metamaterial-based acoustic lenses with slits loaded by periodic Helmholtz resonators. Unlike conventional numerical methods, this study develops a simplified explicit model based on mode-matching techniques, accounting for various factors including thermo-viscous losses and inter-slit evanescent couplings. The results demonstrate excellent agreement with finite-elements method (FEM) solutions in both near- and far-fields across a wide frequency range. Additionally, the study presents experimental validation using a 3D-printed prototype, showcasing successful beam steering and focusing.

1. General description

In this work, we first develop and validate an explicit model for the acoustic radiation of meta-material-based lenses, radiating at the extremity of a baffled duct. The acoustic meta-lenses are made of slits loaded with periodic Helmholtz resonators. The geometry of the baffled duct and of the meta-lens is presented in Fig. 1. By slowing down the sound speed in the slits, it is possible to create a phase-grating capable to steer or to focus an acoustic beam. The model is based on the mode-matching approach (which allows to account for inter-slit evanescent couplings), and accounts for thermo-viscous dissipation in the slits and resonators.

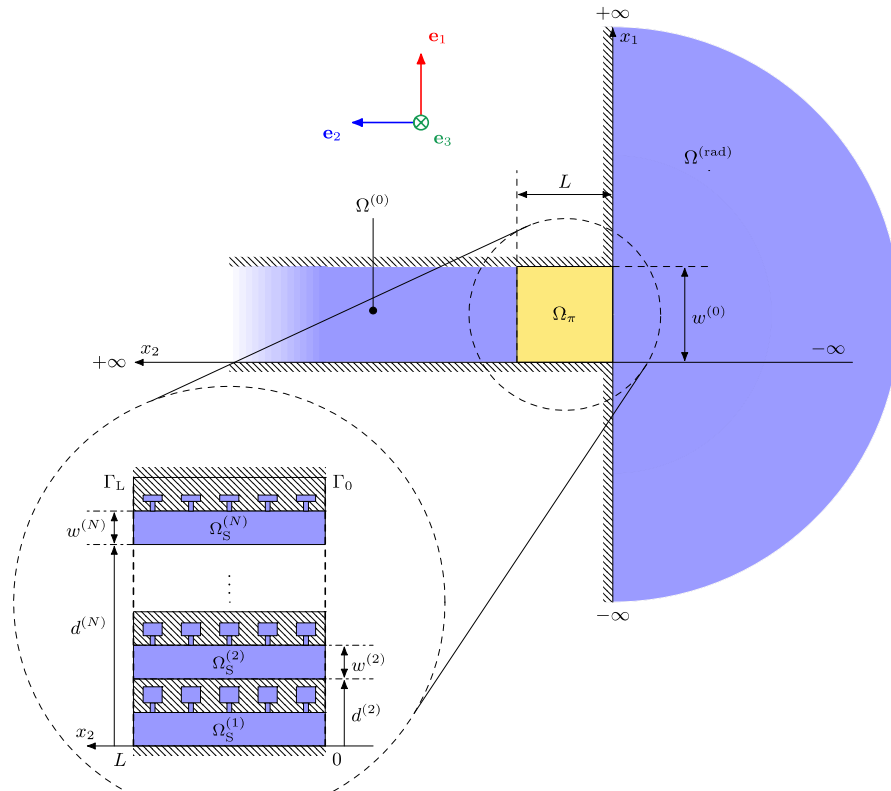


Figure 1. Geometry of the proposed meta-lens comprising 10 slits, each loaded with 5 periodic Helmholtz resonators. The meta-lens is placed in a baffled duct, radiating in a half-space.

2. Main results

After designing an optimal lens for steering a plane wave by $+20^\circ$ at the frequency 2 kHz, a 3D-printed prototype is manufactured. Then, the radiated acoustic pressure from the optimal meta-lens is measured in an anechoic chamber and finally compared to the data predicted by the explicit model and against FEM. Some of the results are shown in Fig. 2 showcasing the excellent agreement of the experimental data with the simulations.

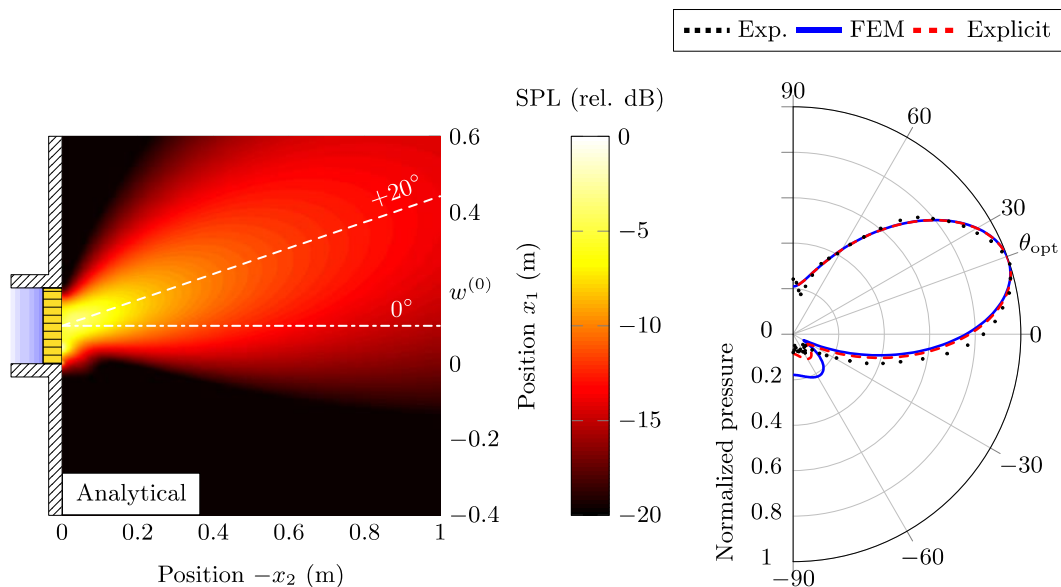


Figure 2. Acoustic pressure distribution over a $1 \times 1 \text{ m}^2$ square region outside the meta-lens (left). Far-field directivity of the meta-lens, showing a beam steering of $+20^\circ$ (right). The explicit and FEM predictions are shown in red and blue respectively, while the experimental data is presented in black dots.

4. Conclusion

In this work acoustic meta-lenses using slits loaded with Helmholtz resonators are studied explicitly, numerically, and experimentally. An explicit two-dimensional model, considering thermos-viscous losses, evanescent couplings, and high-order modes, is validated against (FEM) solutions, demonstrating excellent agreement beyond the main duct's cut-off frequency. Utilizing this explicit model, an optimization process is used to design meta-lenses for steering and focusing, validated through a 3D-printed prototype. Although discrepancies in experimental pressure readings are noted due to finite system dimensions, preliminary numerical results accurately predict these variations. Future improvements may extend the model to three-dimensional geometries, enhancing its applicability in designing acoustic meta-lenses and 3D meta-materials.

5. Acknowledgements

This research was funded by Stellantis, J.-P. G. and V. R.-G. also acknowledge the support of the ANR-RGC METARoom project (ANR-18-CE08-002).

6. References

- [1] T. Betlehem, *et al.*, IEEE Signal Processing Magazine, 32(2):81-91 (2015)

- [2] T. Cavalieri, *et al.*, Phys. Rev. Applied 20, 024012 (2023)
- [3] E. G. Williams, Fourier Acoustics, Academic Press, San Diego, CA (1999)
- [4] V. Romero-Garcia, *et al.*, Phys. Rev. Applied, 14(5) :054055 (2020)

Optimisation topologique large bande de réseaux blazés sous incidence conique

S. Ans¹, G. Demésy², F. Zamkotsian¹

¹ : Aix Marseille Université, CNRS, CNES, LAM (Laboratoire d'Astrophysique de Marseille), UMR7326, 13013 Marseille,

² : Aix Marseille Université, CNRS, Centrale Méditerranée, Institut Fresnel, UMR 7249, 13013 Marseille
 simon.ans@lam.fr

Résumé

En astronomie, la collecte d'un maximum de lumière en un temps restreint est un défi central. Dans ce contexte, les réseaux blazés sous forme de métasurfaces sont une alternative prometteuse au réseau blazé classique en dents de scie. Nous présentons ici une méthode d'optimisation topologique basée sur une modélisation éléments finis des équations de Maxwell pour trouver les meilleures caractéristiques opto-géométriques d'un tel instrument. Plus précisément, nous nous intéressons au cas d'un réseau sous incidence conique, c'est-à-dire un réseau 2D sous une incidence 3D. Les résultats montrent qu'il est possible d'atteindre une efficacité de 98% en réflexion sur l'ordre de diffraction -1 pour une optimisation mono-longueur d'onde. En multi-longueurs d'onde sur l'intervalle $[400,1500]$ nm, l'efficacité moyenne peut être 14% plus élevée qu'avec le réseau en dents de scie classique.

1. Introduction

La spectroscopie est un domaine central en astronomie et en observation de la Terre. L'optimisation du disperser de lumière qui compose les spectroscopes est un sujet de recherche à part entière, mêlant modélisation et expérimentations en laboratoire. L'intérêt principal s'est porté sur l'utilisation de réseaux blazés permettant de réfléchir (ou transmettre) la lumière incidente sur un ordre de diffraction particulier (ici l'ordre -1). Les travaux de recherche les plus avancés sur ce sujet proposent d'utiliser des métasurfaces, dont le design est déterminé par des algorithmes d'optimisation (voir notamment le projet MetaNet [1]).

Nous proposons ici notre propre code d'optimisation, dont le but est d'obtenir un réseau ayant une efficacité de réflexion large bande sur l'ordre -1 . Le réseau obtenu, meilleur que le réseau classique en dents de scie, est présenté.

2. Modélisation et optimisation topologique

Le code développé permet de modéliser la réponse d'un réseau 2D quelconque sous une incidence 3D en résolvant les équations de Maxwell grâce à la Méthode des Elements Finis [2]. On se concentre ici sur le champ électrique \mathbf{E} (voir Figure 1). Cette modélisation repose sur l'utilisation des logiciels open-source Gmsh [3] et GetDP [4]. Le tout est interfacé et contrôlé avec des routines écrites en Python.

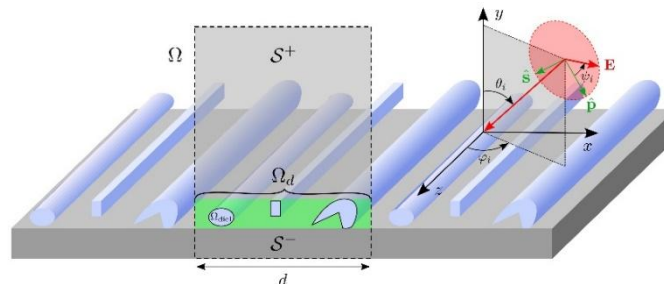


Figure 1. Illustration d'un réseau 2D quelconque sous incidence conique, définie par les angles $\theta_i, \varphi_i, \psi_i$. Le domaine Ω représente le domaine numérique dans lequel la résolution des équations de Maxwell est effectuée. La région Ω_d est appelé « espace de design » et désigne la région dans laquelle l'optimisation de la période du réseau a lieu.

Par la suite, on définit sur le maillage issu des éléments finis un champ de permittivités que l'on peut modifier dans le but d'optimiser l'efficacité en réflexion du réseau sur un ordre de diffraction précis. On utilise pour ce faire l'algorithme d'optimisation GCMMA [5] en calculant la Jacobienne grâce à la méthode de l'adjoint [6]. Cette dernière permet de connaître les dérivées du champ de permittivités à optimiser sur chaque élément du maillage grâce à une unique résolution numérique.

3. Réseau blazé optimisé en multi-longueurs d'onde

On présente sur la Figure 2 le réseau obtenu optimisé sur plusieurs longueurs d'onde ainsi que son diagramme en efficacités, comparé aux performances du réseau blazé en triangles.

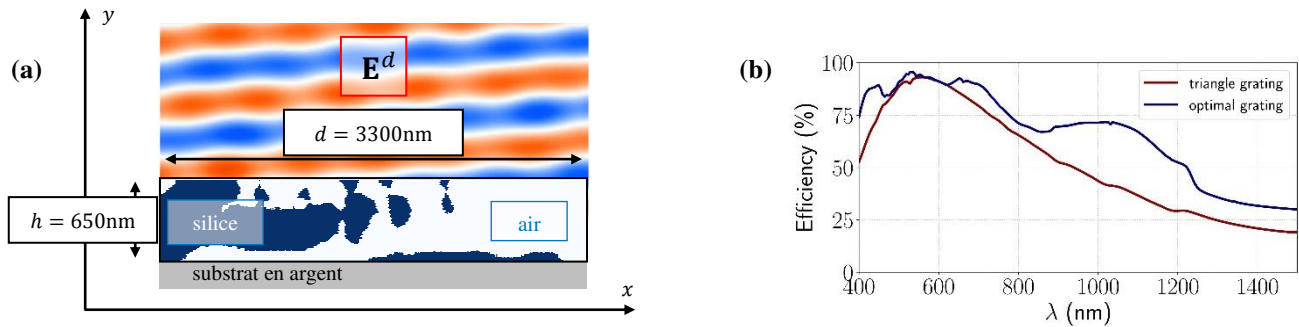


Figure 2. (a) Période de la configuration optimale obtenue avec l’algorithme développé. Le champ incident possède les angles $\theta_i = 5^\circ$, $\varphi_i = -66^\circ$, $\psi_i = 90^\circ$ et l’optimisation est effectuée pour 23 longueurs d’onde dans l’intervalle [400,1500]nm, espacées de 50nm. Cette configuration optimale est montrée avec sa réponse en champ diffracté (projetée sur le plan d’invariance) pour la longueur d’onde $\lambda = 532\text{nm}$, pour laquelle la réflexion sur l’ordre -1 est de plus de 95%. On constate que ce champ diffracté est une onde quasi-plane repartant exactement dans la direction opposée au champ incident ($\theta_r = -5^\circ$). (b) Diagramme en efficacité du réseau optimisé comparé au réseau en triangles.

Ce résultat illustre parfaitement les qualités de notre algorithme. On observe en effet que l’efficacité en réflexion du réseau optimisé est meilleure que celle du réseau en triangle pour chaque longueur d’onde de la bande spectrale [400,1500]nm (visible et proche infrarouge), avec un maximum atteint de 95% à 550nm. En conséquence, l’efficacité moyennée sur toute la bande spectrale est 14% supérieure avec le réseau optimisé.

4. Conclusion

Dans cette contribution, nous avons développé et implémenté un modèle théorique de réseaux sous une incidence conique. Ce modèle a permis d’écrire un code d’optimisation multi-longueur d’ondes pour concevoir un réseau blazé sur l’ordre de diffraction -1 , qui a mené à une configuration meilleure que le réseau blazé classique en triangles sur une large bande, de 400 à 1500nm. L’énergie totale sur cette bande spectrale est plus élevée de 14% pour ce nouveau réseau optimal, démontrant l’efficacité et les possibilités offertes par l’optimisation topologique pour ce type de problème.

5. Remerciements

Les auteurs remercient le CNES et Thales Alenia Space qui co-financent ce projet.

6. Bibliographie

- [1] J. Jiang et al. "MetaNet : a new paradigm for data sharing in photonics research", *Opt. Exp.*, vol. **28**, issue 9, pp. 13670 – 13681, 2020.
- [2] G. Demésy et al. "*Gratings : Theory and Numeric Applications, Second Revisited Edition*". Chap. 5 : *Finite Element Method*, Press. Univ. Prov., 2014.
- [3] C. Geuzaine et al. "Gmsh : a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities", *Int. Journ. Num. Meth. Eng.*, vol. **79**, issue 11, pp. 1309 – 1331, 2009.
- [4] P. Dular et al. "A general environment for the treatment of discrete problems and its application to the finite element method", *IEEE Trans. Magn.*, vol. **34**, issue 5, pp. 3395 – 3398, 1998.
- [5] K. Svanberg. "A class of globally convergent optimization methods based on conservative convex separable approximations", *Soc. Ind. App. Math.*, vol. **12**, issue 2, pp. 559 – 573, 2002.
- [5] E. Kuci et al. "Combination of topology optimization and Lie derivative-based shape optimization for electro-mechanical design", *Struct. Mult. Opt.*, vol. **59**, issue 5, pp. 1723 – 1731, 2019.

Remodeler les plasmons localisés à l'aide de matériaux de permittivité proche de zéro : Application à l'identification des molécules par l'effet SEIRA

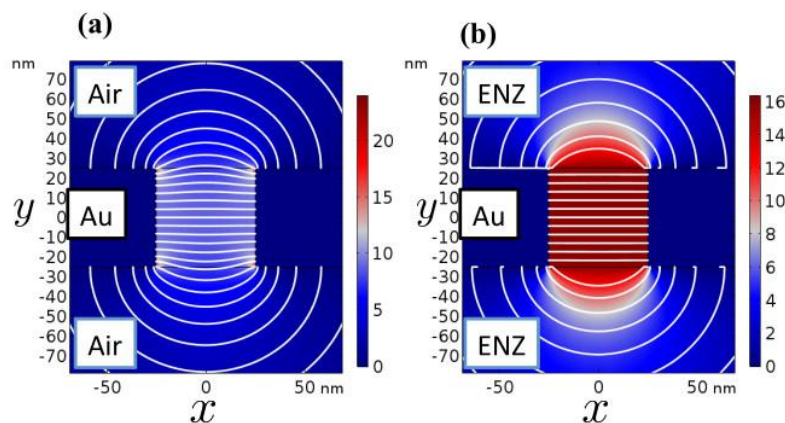
R. Smaali^{1*}, A. Moreau¹, and E. Centeno¹

¹Université Clermont Auvergne, CNRS, SIGMA Clermont, Institut Pascal, F-63000 Clermont-Ferrand, France

* rafik.smaali@uca.fr

Résumé

La spectroscopie infrarouge amplifiée par les effets plasmoniques de surface (SEIRA) se positionne comme une méthode efficace pour l'identification des molécules. Les faibles sections efficaces d'absorption infrarouge des molécules sont compensées par l'amplification du champ électromagnétique résultant de l'excitation des plasmons de surface localisés dans les structures métalliques. La conception actuelle des capteurs plasmoniques implique un subtil compromis entre la détection de volumes moléculaires très faibles et le maintien d'un rapport signal/bruit optimal. Nous démontrons qu'un matériau de permittivité proche de zéro (ENZ), associé à des nano-fentes, lève cette contrainte et offre simultanément un facteur d'amélioration extrême pouvant atteindre 10^7 , ainsi qu'un signal SEIRA fortement contrasté pour des quantités infimes de molécules. Ces résultats s'expliquent par la modification du champ électromagnétique du mode plasmonique dans les fentes en présence du matériau ENZ, Fig. 1. Nous suggérons la mise en œuvre de ce concept avec un semi-conducteur, dont l'ingénierie du niveau de dopage offre une approche polyvalente permettant de couvrir l'ensemble de la gamme de fréquences



d'empreinte moléculaire.

Figure 1 : Module de la composante x du champ électrique normalisé pour des fentes de 50 nm remplies d'air, lorsque la fente est entourée respectivement par de l'air (a) et par un milieu ENZ (b). La permittivité du milieu ENZ est égale à $-0,01$. Les lignes de champ électrique sont représentées en blanc.

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre reconnaissance pour le soutien reçu de l'Agence Nationale de la Recherche du gouvernement français dans le cadre du programme Investissements d'Avenir (n° 16-IDEX-0001 CAP 20-25) et du Laboratoire d'Excellence IMobS3 (n° ANR10-LABX-0016).

Bibliographie

1. T. Tanaka, T-A. Yano and R. Kato, "Nanostructure-enhanced infrared spectroscopy", *Nanophotonics* **11**, 2541-2561 (2021).
2. R. Smaali, T. Taliercio, A. Moreau and E. Centeno, "Reshaping plasmonic resonances using epsilon-near-zero materials for enhanced infrared vibrational spectroscopy", *Applied Physics Letters* **119**, 183701 (2021).

Venez à la découverte de PyMoosh et de Nevergrad

P. Bennet¹, D. Langevin¹, A. Khaireh-Walieh², O. Teytaud³, P. Wiecha², A. Moreau¹

¹ : Université Clermont Auvergne, Clermont Auvergne INP, CNRS, Institut Pascal, F-63000 Clermont-Ferrand, France

² : LAAS, Université de Toulouse, CNRS, Toulouse, France

³ : Meta AI Research Paris, France

pauline.bennet@uca.fr

Résumé

Nous présentons deux bibliothèques Python conçues pour faciliter les études et la conception de structures photoniques.

La première, PyMoosh, permet de calculer les caractéristiques optiques de structures multicouches. 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. La seconde, Nevergrad, n'est pas spécifique à la photonique. Il s'agit d'une plateforme d'optimisation qui peut être utilisée pour faciliter les comparaisons entre différentes méthodes d'optimisation, et qui peut s'interfacer avec n'importe quel programme Python, dont PyMoosh.

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 tant 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.

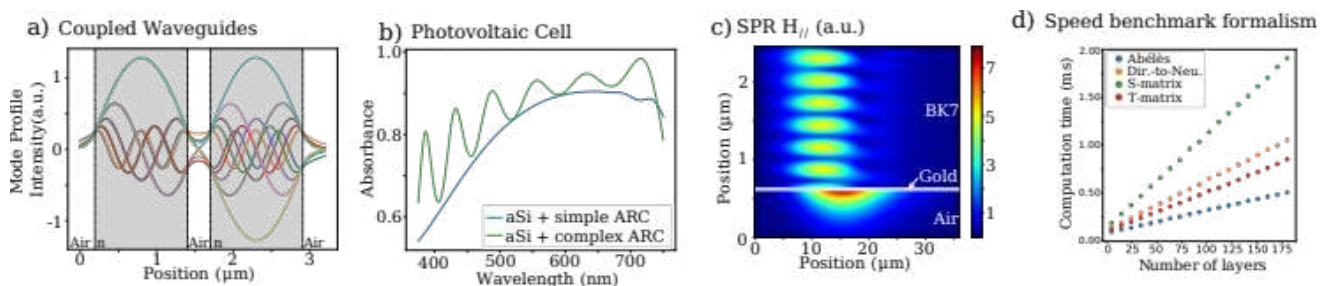


Figure 1. Exemples de fonctionnalités PyMoosh

2. Nevergrad

Il existe de très nombreuses méthodes d'optimisation et il est souvent difficile de déterminer laquelle est la plus pertinente à utiliser. Ces dernières décennies, de nombreux algorithmes d'optimisation ont été (re-)découverts, nécessitant des études complexes de *benchmarking* pour comparer les performances de ces algorithmes sur des problèmes donnés. C'est dans ce cadre que Nevergrad, une plateforme collaborative d'optimisation en libre accès sous Python, a été développée[3]. Nevergrad contient à la fois les algorithmes d'optimisation globale les plus à la pointe du domaine et des ensembles très larges de problèmes de références sur lesquels les algorithmes peuvent être comparés, allant de la photonique à l'amélioration des intelligences artificielles modernes en passant par l'optimisation du réseau d'électricité à Madagascar.

Nous montrons comment utiliser Nevergrad pour comparer la performance de différents algorithmes sur différents cas test de photoniques. Nous détaillons quelles observables -- telles que les *convergence curves* (Fig. 2a) et les *consistency curves* (Fig. 2b) -- sont pertinentes pour juger de la fiabilité d'une optimisation et de la qualité de la solution générée[4].

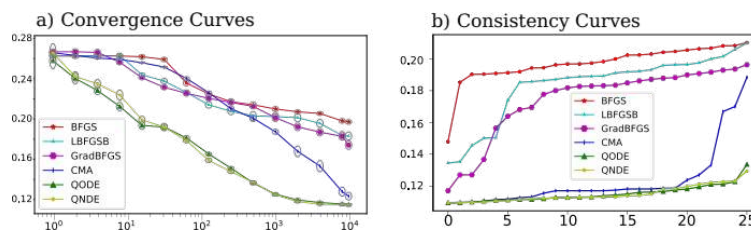


Figure 2: Exemple de fonctionnalités Nevergrad

3. 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 l'interfaçage de Nevergrad avec PyMoosh pour effectuer des optimisations de structures photoniques[4].

4. Conclusion

Dans cette contribution, nous présentons la bibliothèque PyMoosh dédiée à l'étude de structures photoniques multicouches, ainsi que la bibliothèque d'optimisation Nevergrad pouvant s'interfacer avec PyMoosh ou n'importe quel autre programme Python. Ces deux logiciels répondent à des besoins de science ouverte, puisqu'ils sont tous les deux téléchargeables gratuitement, mais aussi de science collaborative, puisque les contributions extérieures sont fortement encouragées afin de proposer des améliorations et évolutions de ces deux plateformes. Ces deux outils numériques présentent une grande polyvalence et sont de plus en plus utilisés par la communauté en photonique.

6. 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] J. Rapin and O. Teytaud, « Nevergrad - A gradient-free optimization platform », <https://GitHub.com/FacebookResearch/Nevergrad>
- [4] Bennet, P. et al., « An illustrated tutorial on global optimization in nanophotonics », <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.09760>

Etude de l'efficacité d'extraction de la lumière d'un réseau résonant sinusoïdal

Victor Kalt * ¹, Emmanuel Centeno ¹, Rafik Smaali ¹

¹ Institut Pascal – Centre National de la Recherche Scientifique, Université Clermont Auvergne, Institut national polytechnique Clermont Auvergne – Campus Universitaire des Cézeaux, 4 avenue Blaise Pascal, TSA 60026 / CS 60026, 63178 Aubière Cedex, France

*Intervenant

Generalized Drude-Lorentz model complying with the Singularity Expansion Method

I. Ben Soltane, F. Dierick, B. Stout, N. Bonod

¹ : Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Marseille, Institut Fresnel, 13013 Marseille, France.

Abstract

Deriving analytical expressions of dielectric permittivities is required for numerical and physical modeling of optical systems and the soar of non-hermitian photonics motivates their prolongation in the complex plane. Analytical models are based on the association of microscopic models to describe macroscopic effects. However, the question is to know whether the resulting Debye Drude Lorentz models are not too restrictive. Here we show that the permittivity must be treated as a meromorphic transfer function that complies with the requirements of complex analysis. This function can be naturally expanded on a set of complex singularities. This singularity expansion of the dielectric permittivity allows us to derive a generalized expression of the Debye Drude Lorentz model that complies with the requirements of complex analysis. We show that the complex singularities and other parameters of this generalized expression can be retrieved from experimental data acquired along the real frequency axis

1. Introduction

The description of the permittivity of materials *via* analytical expressions is of fundamental interest in the field of optics and electromagnetism. Analytical models are relevant to provide simple and relevant descriptions of the interaction between materials and excitation fields [1,2]. They are also of strong interest for computational modeling and numerical methods such as time-domain numerical methods [3,4]. Besides the need of analytical description of the dielectric permittivity on real frequencies, modal analysis of open systems and non-hermitian photonics requires the description of the dielectric permittivities on the complex frequency plane. By expressing the permittivity as the transfer function of a physical system, we show that the singularity expansion method (SEM) is the natural way to obtain an exact expression of the permittivity in terms of its poles ω_p and its residues r_p [5,6]:

$$\mathcal{E}(\omega) = \varepsilon_{NR} + \frac{r_0}{\omega} \sum_{\ell=1}^{N+M} \left[\frac{r_p^{(\ell)}}{\omega - \omega_p} - \frac{\bar{r}_p^{(\ell)}}{\omega + \omega_p^{(\ell)}} \right]$$

2. Generalized Drude-Lorentz model

With a change of variables, the SEM can be rewritten in a form including the Drude and Lorentz models which we refer to as the Generalized Drude-Lorentz model (GDL):

$$\mathcal{E}(\omega) = \varepsilon_{NR} + \varepsilon_0 \left(\frac{\gamma_0}{\omega} - \sum_{\ell=1}^M \frac{\omega_{b,\ell}^2}{\omega + i\omega\gamma_\ell} - \sum_{\ell=1}^N \frac{is_{1,\ell}\omega\Gamma_\ell + s_{2,\ell}\omega_{0,\ell}^2}{(\omega^2 - \omega_{0,\ell}^2) + i\omega\Gamma_\ell} \right)$$

The N generalized Lorentz terms include an imaginary term $is_{1,\ell}\omega\Gamma_\ell$ which is not found in the classical Lorentz model. It can be traced back to the constitute relations where it translates into a contribution of the time derivative of the electric field to the displacement field. This term is required to accurately model some materials, in particular non-metallic ones such as SiO_2 and Ta_2O_5 (see Figure 1).

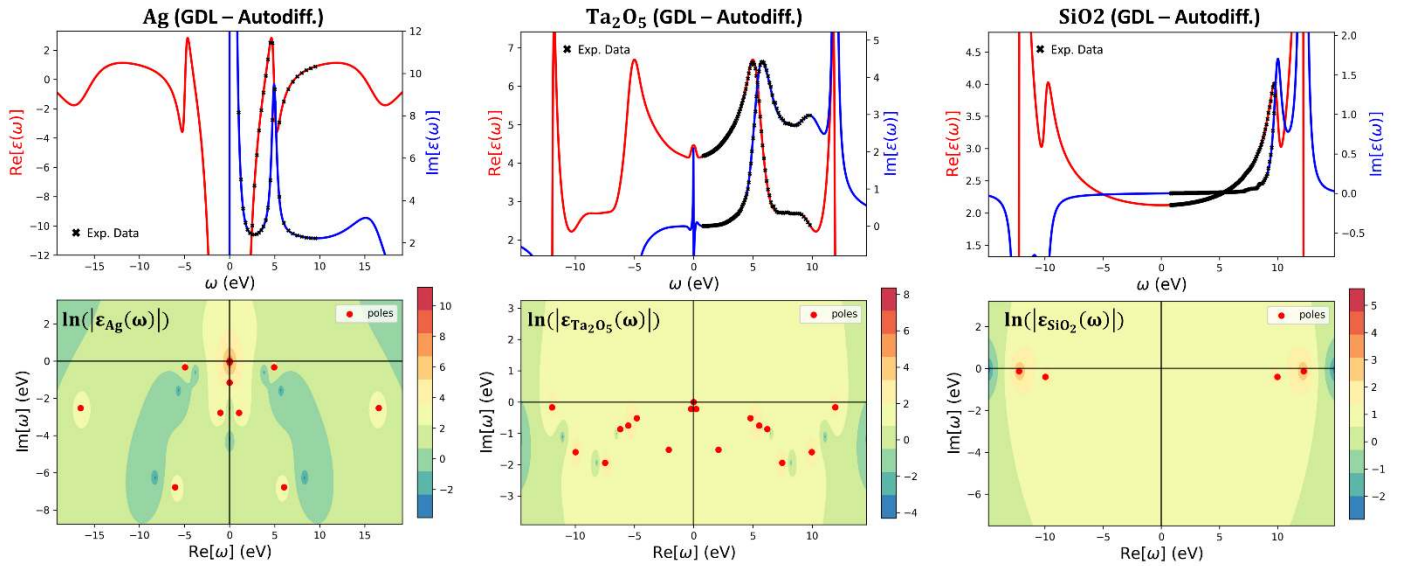


Figure 1 - Modulus of the permittivity of silver (Ag) and tantalum pentoxide (Ta2O5) over the real frequency axis (top plots) and log-amplitude in the complex frequency plane (bottom plots). The singularities are indicated by the red dots in the complex plane.

3. Accuracy of the approach

Using the generalized model, highly accurate expressions of the dielectric permittivities of various materials can be obtained over a large spectral window ranging from the UV to the NIR, with a small set of singularities. The parameters are obtained *via* auto-differentiation with Pytorch. The relative (L_2 or L_∞) errors are then computed by comparing the model to the experimental data at real frequencies. The results are summarize in Table 1.

Material	Relative Errors of the Fitting			
	N	M	error ₂ (%)	error _∞ (%)
Au	9	1	0.220	0.265
Ag	6	1	0.009	0.007
Co	6	2	0.193	0.257
Cr	3	1	0.348	0.569
HfO ₂	3	1	0.092	0.419
SiO ₂	2	1	0.282	1.177
TiO ₂	8	1	0.208	0.891
Ta ₂ O ₅	8	1	0.508	1.222
Graphene	10	1	0.080	0.328

Table 1 - Relative errors between the experimental data and the GDL model for the 9 materials in Table S1 of the SI

Acknowledgements

This work was funded by the French National Research Agency ANR Project DILEMMA (ANR-20-CE09-0027).

References

- [1] F. Andreoli, M. J. Gullans, A. A. High, A. Browaeys, D. E. Chang, Phys. Rev. X 2021, 11 011026.
- [2] H. Shim, F. Monticone, O. D. Miller, Advanced Materials 2021, 33, 43 2103946.
- [3] K. S. Kunz, R. J. Luebbers, CRC press, 1993.
- [4] A. Taflove, Computational electromagnetics 1995.
- [5] C. E. Baum, Interaction note 1971, 88, 11.
- [6] I. Ben Soltane, R. Colom, F. Dierick, B. Stout, N. Bonod, New J. Phys. 2023, 25 103022

Démonstration d'un solveur modal pour les problèmes électromagnétiques, libre et gratuit, basé sur les éléments finis avec les logiciels ONELAB/Gmsh/GetDP

G. Renversez et G. Demésy

*Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Marseille, Institut Fresnel, Marseille, France
gilles.renversez@fresnel.fr***Résumé**

Nous effectuons des démonstrations en temps réel de notre solveur modal libre et gratuit pour des problèmes de guides d'onde électromagnétiques. Ce solveur est basé sur les éléments finis avec les logiciels ONELAB/Gmsh/GetDP

1. Introduction

L'étude théorique ou numérique des propriétés des structures guidant la lumière est souvent un point de départ nécessaire à leurs utilisations pratiques. Une des premières études requises est la détermination des modes de la région de la structure pouvant être considérée comme invariante le long de l'axe de propagation. Il peut s'agir pour cela aussi bien de l'utilisation de méthodes semi-analytiques, d'abaques, ou de modélisations plus ou moins approchées. Un des exemples les plus connus est celui de la fibre optique à saut d'indice où la connaissance des paramètres modaux U et W , de la fréquence normalisée V ainsi que de l'équation de dispersion permet après des calculs relativement simples de connaître les modes guidés pouvant s'y propager ainsi que leurs principales propriétés [1]. Toutefois cet exemple est un cas d'école particulier et, dès que des fibres optiques avec des profils géométriques plus réalistes sont à considérer, les calculs deviennent soit plus complexes (cas de fibres à dispersion décalée où il faut considérer une autre interface) soit impossibles avec cette méthode (cas des fibres optiques micro-structurées). Un autre exemple est celui de l'utilisation des guides rubans où la méthode de Marcattilli donne des résultats approchés relativement corrects mais qui perd beaucoup de son utilité quand des sections de guides multi-couches sont à étudier ou quand les profils sont trapézoïdaux. La solution désormais communément employée est d'utiliser un logiciel extérieur permettant de déterminer les modes pour un ensemble prédéfini de guides d'onde. On peut notamment citer le logiciel commercial Comsol. Ces types de logiciels sont extrêmement puissants et permettent de calculer bien d'autres choses que la simple détermination des modes, mais il y a à au moins deux inconvénients majeurs: le coût des licences est très élevé surtout pour un usage multi-utilisateurs comme cela peut l'être dans les laboratoires, et les doctorants et post-doctorants formés sur un logiciel donné dans un laboratoire perdent l'usage de leurs programmes et scripts en changeant de laboratoire si ce dernier ne dispose pas du même logiciel. Afin d'apporter une solution à ce problème, mais aussi de diffuser l'usage de la méthode des éléments finis en photonique[2,3,4] nous proposons un modèle libre permettant le calcul des modes de plusieurs types de guides d'onde invariant le long de leur axe de propagation. Un fonctionnement de type boîte noire via une interface graphique est proposée par défaut mais un fonctionnement via des scripts est aussi possible. Ce modèle est basé sur la méthode des éléments finis et s'appuie entièrement sur les logiciels libres multi-plateformes ONELAB/Gmsh/GetDP développés depuis de nombreuses années [5,6,7,8] par Christophe Geuzaine de l'Université de Liège et plusieurs collègues localisés principalement en Europe.

Dans notre démonstration, nous décrivons et expliquons les principales fonctionnalités offertes par notre logiciel sur des exemples simples.

2. Généralités

Le logiciel détermine les modes guidés ou à fuites de guides d'onde de section transverse bidimensionnelle c-à-d qu'il calcule les constantes de propagation des modes (valeurs propres) et leurs profils (vecteurs propres) ou cartes des champs électromagnétiques, par la méthode des éléments finis en résolvant la formulation faible du problème modal dans une approche de type Galerkin. Les éléments finis sont construits sur une "partition fine" de la géométrie de la structure à modéliser qui forme le maillage. Ce dernier est généré par le mailleur, le logiciel Gmsh dans notre cas [5,7].

Dans la méthode des éléments finis on décrit le champ inconnu du problème à résoudre par une somme (finie) de fonctions de formes avec des coefficients de pondération qui sont les nouvelles inconnues du problème. Ensuite, les équations aux dérivées partielles à résoudre, dans le cas de notre problème aux valeurs propres associé à la détermination des modes des guides les équations de Maxwell en prenant en compte la dépendance fixée en $\exp(i\beta z)$ le long de l'axe z pris comme axe de propagation, sont réécrites dans une formulation intégrale du problème appelée "formulation faible" du problème initial où interviennent des fonctions de poids. Comme c'est l'approche de Galerkin qui a été choisie ces fonctions sont les mêmes que les fonctions de forme utilisées pour décrire les champs inconnus. In fine, on obtient un système linéaire correspondant au problème aux valeurs propres que l'on souhaite résoudre. Toutes ces étapes sont pré-implémentées dans le solveur pour nous le logiciel GetDP [6,8]. Comme le système est de taille importante GetDP fait appel à des bibliothèques de calcul spécialisées pour le résoudre, en l'occurrence PETSc et SLEPc.

3. Caractéristiques et fonctionnement

Nos modèles de guides d'onde sont développés au sein de l'interface de gestion ONELAB qui est une sur-couche logicielle (toujours libre) permettant de piloter facilement le mailleur très puissant Gmsh et le solveur éléments finis GetDP. Nos modèles de guide s'insèrent de manière transparente dans ONELAB et sont directement utilisables y compris par un utilisateur ne connaissant pas la méthode des éléments finis. Dans la version proposée, seuls les problèmes vectoriels sont traités, avec l'utilisation d'éléments dit d'arêtes pour décrire la partie transverse des champs électromagnétiques et d'éléments scalaires pour décrire la composante longitudinale des champs. C'est un fonctionnement de type boîte noire qui est alors effectué pour les modèles proposés. Actuellement les modèles fournis sont des modèles de guides d'onde ayant une section bidimensionnelle invariante le long de leur axe de propagation. On peut citer: la fibre optique circulaire à saut d'indice avec une gaine optique supposée infinie, une fibre micro-structurée ayant entre 1 à 3 couronnes d'inclusions de bas indice dans une matrice de haut indice, une fibre micro-structurée à cœur creux ayant entre 1 à 3 couronnes d'inclusions de bas indice dans une matrice de haut indice, un guide ruban sur substrat. Des études paramétriques sur les paramètres géométriques des guides proposés sont possibles dans le cadre de l'interface graphique offerte par ONELAB ainsi que sur les indices de réfraction. Dans sa version actuelle, la dispersion matérielle n'est pas prise en compte, mais devrait l'être dans la prochaine version du logiciel fourni pour les matériaux les plus courants utilisés en photonique.

4. Bibliographie

- [1] A. W. Snyder and J. D. Love, *Optical Waveguide Theory*. New York : Chapman & Hall, 1983.
- [2] G. Demésy, F. Zolla, A. Nicolet, M. Commandré, and C. Fossati, "The finite element method as applied to the diffraction by an anisotropic grating," *Opt. Express*, vol. 15, no. 26, pp. 18 089–18 102, 2007.
- [3] F. Zolla, G. Renversez, A. Nicolet, B. Kuhlmeiy, S. Guenneau, D. Felbacq, A. Argyros, and S. Leon-Saval, *Foundations of Photonic Crystal Fibres*, 2nd ed. London : Imperial College Press, 2012.
- [4] G. Demésy and G. Renversez, "Discontinuities in photonic waveguides : rigorous maxwell-based 3D modeling with the finite element method," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 37, no. 6, pp. 1025–1033, 2020.
- [5] C. Geuzaine and J.-F. Remacle, "Gmsh : a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 79, no. 11, pp. 1309–1331, 2009.
- [6] P. Dular, C. Geuzaine, F. Henrotte, and W. Legros, "A general environment for the treatment of discrete problems and its application to the finite element method," *IEEE Trans. Mag.*, vol. 34, no. 5, pp. 3395–3398, 1998.
- [7] C. Geuzaine and J.-F. Remacle, *Gmsh Reference Manual*, gmsh 4.11.1 ed., December 2022, <http://gmsh.info>.
- [8] P. Dular and C. Geuzaine, *GetDP Reference Manual*, GetDP 3.5.0 ed., May 2022, <http://getdp.info>.

[2] ZZZ D, *Title of book*, Publishing House, City, Year.

[3] VVV E, Title of contribution, *Abbreviated Title of Conference*, Proc. pp. n-m, City, Month and Year.

Measurement of photo-induced thermal radiation in optical coatings

François Thullier^{1,2,*}, Myriam Zerrad¹, Claude Amra¹, Hélène Krol²

¹ : Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Marseille, Institut Fresnel, Faculté des Sciences - Campus Saint Jérôme, Avenue Escadrille Normandie-Niemen, 13397 Marseille, France

² : CILAS, 600 avenue de La Roche Fourcade, Pôle Alpha-Sud, 13400 Aubagne, France

*francois.thullier@fresnel.fr

Abstract

Photo-induced thermal radiation (PhTR) has not yet been deeply studied in optical thin films. Now that a complete multilayer PhTR theory has been published for arbitrary temporal and spatial illumination regimes, we focus on a PhTR facility under development, which aims to perform a temporal, spectral and angular characterization of PhTR. The sample is illuminated with a nano-second pulsed laser operating at 20 Hz. The resulting absorption is at the origins of a temperature elevation which creates a pulsed PhTR that we record in different MIR spectral ranges at all directions versus time. Preliminary results on multilayer broad-band absorbers are highlighted, and successfully compared with theory. These first results allow to identify the difficulties that arise when dealing with all-dielectric stacks, whose absorption levels are lower by several decades. In particular the signal must be maximized while respecting the thermal and dielectric damage thresholds, which leads to compromises and favors spectral windows in connection with the choice of detectors.

1. Introduction

Unlike scattering, absorption and laser induced damage, photo-induced thermal radiation (PhTR) has not yet been deeply studied in optical thin films [1-5]. PhTR finds applications in space optics, energy conversion, defense, identification and security. Our first step was to build a complete theory [6-7] for arbitrary temporal and spatial illumination regimes. The next step, which is the purpose of this paper, is focused on a PhTR experimental facility under development at Institut Fresnel. We address measurements of photo-induced thermal radiation from broad-band metal/dielectric absorbers. The pulsed regime (10ns) is considered at wavelength 532 nm with a few mJ of energy per pulse, and a 6 mm spot size. We also highlight the correlation between experimental data and theory.

2. Description of the experimental setup

The incident pulse is splitted into two parts (figure 1). The reflected beam goes towards a reference photodiode for beam characterization and pulse energy measurement, while the transmitted beam illuminates the sample. The interaction with the coating generates a temperature elevation that depends on source parameters (energy, spot size, polarization) and sample parameters (optical, thermal and geometrical parameters...).

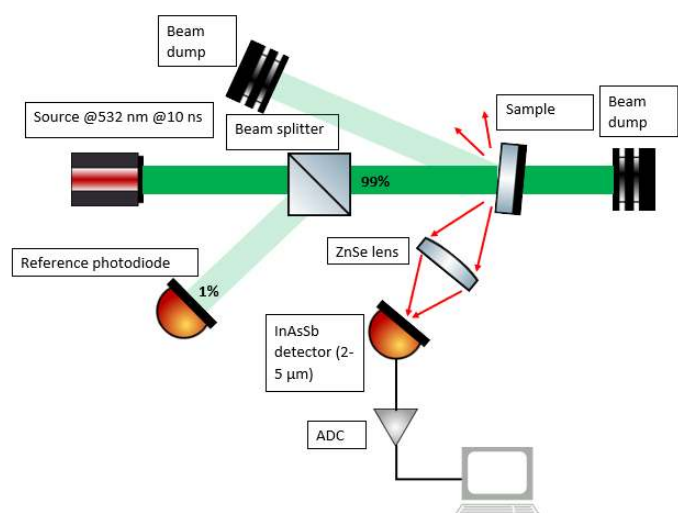


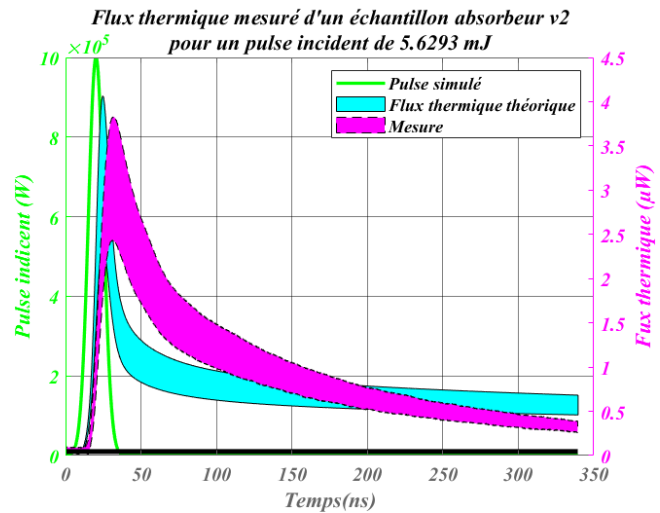
Figure 1. Experimental setup for PhTR measurement

The temperature elevation of the sample generates a modulated thermal emission which is measured with an IR detector mounted on a rotation stage for angular characterization. A ZnSe lens is used to focus thermal emission into the detector.

3. First results

In figure 2 we present first measurements of PhTR (magenta curve), which can be compared with simulation (cyan curve). The ns excitation is plotted in green. Each curve has its own root mean square error, as the result of uncertainties and standard deviation of pulse energy and spectral voltage responsivity.

Figure 2. First PhTR measurement on a black coating [8]



4. Conclusion

In this contribution, first PhTR data on black coatings were registered in a ns regime and compared with theory. The results are satisfactory, even if the values of the thermal parameters still need to be properly framed. The next step will be to analyze all dielectric multilayers whose absorption losses are lower by several decades. The signal must be maximized while respecting the thermal and dielectric damage thresholds [5,7], which leads to compromises and favors spectral windows in connection with the choice of detectors.

5. Acknowledgements

This research was funded by CILAS and the ANRT within the LabTOP and CNES (R&T Thermal Radiation)

6. Bibliography

1. B. J. Lee and Z. M. Zhang, "Coherent thermal emission from modified periodic multilayer structures," *J. Heat Transf.* 129, 17–26 (2007).
2. M. Francoeur, M. Pinar Mengüç, and R. Vaillon, "Solution of near-field thermal radiation in one-dimensional layered media using dyadic Green's functions and the scattering matrix method," *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* 110, 2002–2018 (2009).
3. J.-J. Greffet, P. Bouchon, G. Brucoli, and F. Marquier, "Light Emission by Nonequilibrium Bodies: Local Kirchhoff Law," *Phys. Rev. X* 8, 021008 (2018).
4. D. L. C. Chan, M. Soljačić, and J. D. Joannopoulos, "Direct calculation of thermal emission for three-dimensionally periodic photonic crystal slabs," *Phys. Rev. E* 74, 036615 (2006).
5. J. Y. Natoli, L. Gallais, H. Akhouayri, and C. Amra, "Laser-induced damage of materials in bulk, thin-film, and liquid forms," *Applied Optics* 41, 3156-3166 (2002).
6. P. Rouquette, C. Amra, M. Zerrad, C. Grèzes-Besset, and H. Krol, "Photo-induced Temperature in Optical Interference Coatings," *Opt. Express Press* (2022).
7. P. Rouquette, C. Amra, M. Zerrad, C. Grèzes-Besset, and H. Krol, "Photo-induced thermal radiation of optical interference coatings submitted to a spatio-temporal illumination," *Opt. Express* 31, 35431-35452 (2023)
8. Hélène Krol, Grégory Chauveau, Colin Bondet de la Bernardie, Baptiste Grasmuck, Dragan Stojcevski, and Catherine Grèzes-Besset "Dense black absorbing coatings for parasitic light reduction", *Proc. SPIE 10706, Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation III*, 1070620 (10 July 2018); <https://doi.org/10.1117/12.2313430>

La méthode DADI-inverse : un outil pour calculer les polarisabilités atomiques dynamiques



N. Brosseau-Habert^{1,2}, F. Miradji¹, M. Devel¹, S. Picaud²
¹ : Institut FEMTO-ST,
² : Institut UTINAM,
nicolas.brosseau-habert@univ-fcomte.fr



Résumé

Parmi les méthodes utilisées pour calculer les propriétés optiques des particules carbonées dans l'atmosphère terrestre et dans le milieu interstellaire, la méthode Dynamic Atomic Dipole Interaction (DADI) développée à Besançon présente l'avantage d'être sensible à la morphologie de la particule à l'échelle atomique et aux fonctions chimiques qu'elle contient. Elle nécessite cependant de connaître les polarisabilités atomiques dynamiques de tous les atomes composant la particule. Nous présentons ici une paramétrisation adéquate pour certaines espèces atomiques sur la gamme UV-visible du spectre. En particulier, nous avons ajusté les polarisabilités atomiques pour le carbone, l'hydrogène et l'oxygène, en fonction du groupement fonctionnel dans lequel ils sont engagés, sur la base des sections efficaces d'absorption de petites molécules, calculées avec le code ab-initio Octopus. Ces paramètres ont ensuite été utilisés pour calculer les coefficients d'absorption massiques de particules de suite modèles.

1. Introduction

Les particules de suies émises par les procédés de combustion ont un impact non négligeable sur le forçage radiatif de l'atmosphère [1].

Elles présentent par ailleurs certaines analogies avec différentes formes de matériaux carbonés observées dans le milieu interstellaire et les atmosphères d'exoplanètes (fullerènes, graphite, HAPs, etc.) [2, 3]. Les mécanismes physico-chimiques du processus de formation de ces objets restent obscurs, notamment en ce qui concerne l'étape des réactions chimiques entre les petits composants organiques et les nanostructures de carbone [4] et leurs rôles couplés dans l'évolution du milieu interstellaire [5].

Jusqu'à présent, l'observation à distance de l'interaction de ces objets carbonés avec la lumière est le seul moyen de les caractériser *in situ*. Nous cherchons donc à obtenir de meilleures estimations des sections efficaces d'absorption de ces particules dans la partie UV-visible du spectre, en fonction de leur structure détaillée (géométrique et chimique), afin de mieux les caractériser.

2. Méthode numérique

Pour calculer les propriétés optiques de particules de formes arbitraires, le modèle DADI présente l'avantage distinctif par rapport aux méthodes de type ADDA ou T-matrix, d'être sensible aux caractéristiques atomiques de la particule et au détail des fonctions chimiques qu'elle contient [6-9]. Ce modèle nécessite cependant une paramétrisation adéquate des polarisabilités atomiques dynamiques pour toutes les espèces atomiques formant la particule [9], sur le spectre UV-visible, ainsi que la connaissance de toutes les coordonnées atomiques.

Afin d'obtenir des valeurs de polarisabilités atomiques, nous avons mis au point la méthode « DADI-inverse » qui consiste à effectuer le chemin en sens inverse : à partir de sections efficaces d'absorption – obtenues grâce au code de TD-DFT Octopus [10] – et de la géométrie des molécules correspondantes, les tenseurs de polarisabilités atomiques des atomes des molécules en fonction de leur environnement sont optimisés de sorte qu'en utilisant ensuite ces paramètres avec DADI, on obtienne le meilleur accord possible avec les sections efficaces ab-initio initialement considérées.

3. Résultats

A partir d'une base de données constituée des sections efficaces d'absorption de 35 petites molécules (13 HAPs et 22 hydrocarbures aromatiques monocycliques contenant de l'oxygène dans différentes fonctions chimiques), nous avons utilisé la méthode DADI-inverse pour obtenir les tenseurs de polarisabilités atomiques anisotropes de l'atome de carbone lorsqu'il possède 3 voisins et les tenseurs de

polarisabilités atomiques isotropes de l'atome de carbone possédant 4 voisins. Nous avons fait de même pour l'atome d'hydrogène et les atomes d'oxygène avec 1 et 2 voisins. En utilisant les valeurs optimales de ces paramètres, l'accord entre sections efficaces d'absorptions de ces mêmes molécules, calculées avec le modèle DADI (courbes vertes sur la figure 1) et calculées par TD-DFT (courbes bleues sur la Figure 1) semble très satisfaisant (faible écart des points rouges correspondant à diverses molécules et diverses énergies par rapport à la droite noire marquant l'égalité des sections efficaces calculées par les deux méthodes) Ceci nous semble prouver la validité de notre méthode d'ajustement des polarisabilités atomiques dynamiques pour les atomes C, O et H, avec plusieurs coordinances dans le cas de C et O.

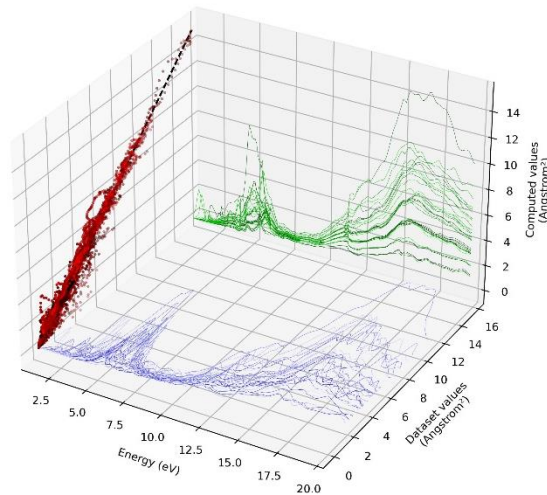


Figure 1 : Corrélation entre les sections efficaces d'absorption calculées avec le modèle DADI à partir des polarisabilités atomiques ajustées et les sections efficaces calculées avec Octopus pour 35 petites molécules.

4. Conclusion

Dans cette contribution, nous avons montré l'intérêt de la méthode DADI-inverse pour obtenir des valeurs de polarisabilités atomiques dynamiques pour des atomes C, O et H engagés dans différentes fonctions chimiques. Ces paramètres pourront ensuite être utilisés pour calculer, à l'aide de la méthode DADI, les propriétés optiques de particules de suie modèles, comportant trop d'atomes pour être traitées dans un temps raisonnable par des codes de chimie quantique. Un effet notable dû au changement de coordination de certains atomes lors de la coalescence de deux particules de suies a ainsi pu être observé numériquement.

5. Remerciements

Ce travail est réalisé dans le cadre du projet IOS financé par l'EUR EIPHI (contrat ANR-17-EURE-0002) et la région de Bourgogne, Franche-Comté. Certains calculs ont été faits sur le superordinateur du Mésocentre de calcul de Franche-Comté.

6. Bibliographie

- [1] T.C. Bond et al., *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. **118**, pp. 5380-5552, 2013.
- [2] H. Sabbah et al., *ApJ*, vol. **931**, pp. 91-102, 2022.
- [3] D. Dubey et al., *A&A*, vol. **A53**, pp. 678-687, 2023.
- [4] H. Qi et al., *ApJ*, vol. **867**, pp. 133-140, 2018.
- [5] N.J. Demarais et al., *ApJ*, vol. **746**, pp. 32-37, 2012.
- [6] F. Moulin, M. Devel, S. Picaud, *JQSRT*, vol. **109**, pp. 1791-1801, 2008.
- [7] R. Langlet, M.R. Vanacharla, S. Picaud and M. Devel, *JQSRT*, vol. **110**, pp. 1615-1627, 2009.
- [8] C. Garcia-Fernandez, S. Picaud, M. Devel, *JQSRT*, vol. **164**, pp. 69-81, 2015.
- [9] M. Rérat et al., *Theor. Chem. Acc.*, vol. **141**, pp. 65-75, 2022.
- [10] A. Castro et al., *Phys. Stat. Sol.*, vol. **243**, pp. 2465-2488, 2006.

Characterizing the optical properties of a bio-inspired material using Symbolic Regression

Julian SIERRA-VELEZ¹, Alexandre VIAL¹, Demetrio MACIAS¹

¹ *Laboratory Light, nanomaterials & nanotechnologies – L2n, University of Technology of Troyes & CNRS EMR 7004, France*

Abstract

Modeling the optical properties of biological structures allows the development of novel biocompatible materials. The white color of the beetle « *Cyphochilius insulanus* » Fig.(1a) have been of great interest of study due to the color generated by its complex structure. As a first approach, we replicated this structure with a porous thin film of PMMA with spherical air inclusions, and modeled it using Maxwell-Garnett effective medium theory. In this work, we used Symbolic Regression (SR) to retrieve, from spectral information, a closed-form expression for the refractive index of this bio-inspired material.

1. Introduction

The use of biomimetics for the design of highly engineered novel materials has shown promising results[1]. However, the optical properties of organic materials or animal tissues, are poorly investigated. Approaches based on Deep Learning (DL) have proven to be very effective in bio-materials research despite the fact that they require preliminary hypotheses on the algebraic form of the physical model searched[2]. Strategies based on a physics-assisted DL approach have succeeded in making neural networks no longer perceived as "black boxes." We propose an alternative: Symbolic Regression (SR) analysis, a somewhat forgotten Machine Learning method whose potential has recently been explored again. This method provides, without any preliminary hypothesis, a closed-form expression of the model searched[3]. We have recently used SR to characterize the optical properties of two organic materials[4]. It thus seems worth to extend the applicability of SR to characterize the optical properties of bio-structures, like the wings of the beetle « *Cyphochilius insulanus* » Fig.(1a), who are responsible for its white coloration.

In ref.[5], they replicated this structure Fig.(1b) with porous polymeric thin films. To keep the complexity of the problem at a manageable level, we replicated it with a porous thin film of PMMA with spherical air inclusions, and modeled it using Maxwell Garnett (MG) effective medium theory. Our objective in this work is to retrieve a closed-form expression for the refractive of this bio-inspired material as a function of the incident wavelength and the filling factor.

2. Statement of the problem

We model the porous structure in Fig.(1b) as the unsupported thin film presented in Fig.(1c). Spherical air bubbles ($n_i = \sqrt{\epsilon_i} = 1$) are immersed in a PMMA matrix characterized by the Sellmeier model ($n_h = \sqrt{\epsilon_h}$) in Eq.(1). The structure is characterized by the Maxwell-Garnett (MG) effective refractive index ($n_{eff}^{MG} = \sqrt{\epsilon_{eff}^{MG}}$) in Eq.(2). To respect the validity limits of MG and the simple scattering approximations when generating the spectrum, we respectively assume that the bubbles are small with respect to the shortest wavelength with a radius of $a = 20\text{ nm}$, that it is a dilute system with a filling factor of $f \in [0.01, 0.1]$, and the structure thickness is assumed to be $d = 80\text{ nm}$. For the study of the optical response we illuminated with a plane wave at an incident angle of $\theta_i = 30^\circ$, and implemented Fresnel equations to calculate the Reflectance and Transmittance spectrum.

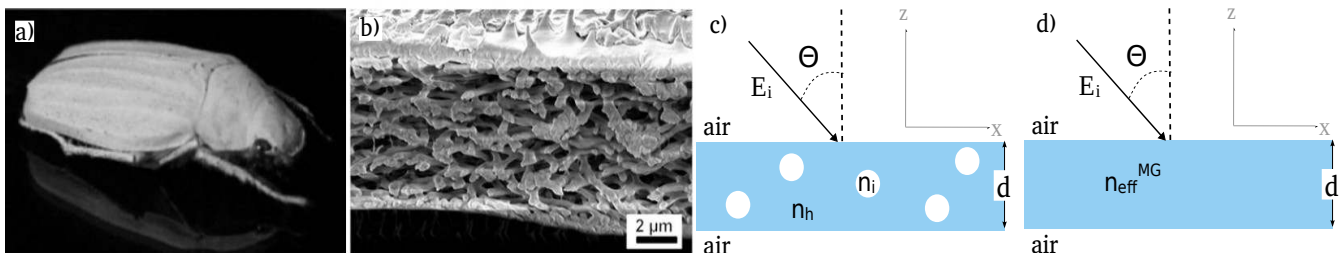


Figure 1. a) White beetle « *Cyphochilius insulanus* », b) Porous structure corresponding to a transversal cut of the beetles' wing (adapted from ref.[5]), c) Porous structure considered in this work, d) effective homogeneous media described by MG.

$$\varepsilon_h(\lambda) = 1 + \frac{0.996 \lambda^2}{\lambda^2 - 0.008} + \frac{0.189 \lambda^2}{\lambda^2 - 0.022} + \frac{0.004 \lambda^2}{\lambda^2 - 3.857} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{eff}^{MG}(\lambda, f) = \varepsilon_h(\lambda) + \frac{1 + 2f \alpha(\lambda)}{1 - f \alpha(\lambda)}, \text{ with } \alpha(\lambda) = \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_h(\lambda)}{\varepsilon_i + 2\varepsilon_h(\lambda)} \quad (2)$$

3. Results

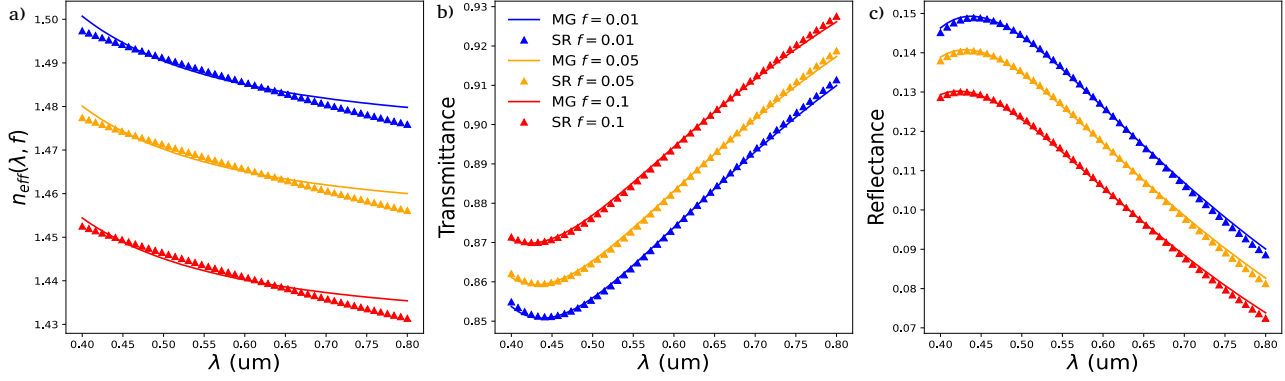


Figure 2. a) Effective refractive index, b) Transmittance, c) Reflectance. In all the figures the solid line represent the values given by the MG effective medium theory, the triangles the predicted values by the SR, blue a filling factor of $f=1\%$, orange for $f=5\%$, and red for $f=10\%$.

$$n_{eff}^{SR}(\lambda, f) = f + 1.388 - \frac{1.477 f \lambda + 2f - 0.198}{\lambda + 1.329} \quad (3)$$

4. Conclusion

In this work, we have successfully retrieved the closed-form mathematical expressions for the refractive index of a bio-inspired material by means of SR Eq.(3). The visual comparison between the retrieved and the MG expressions could seem disappointing at first glance because their algebraic forms are far from identical. However, this somehow expected result can be explained if we develop Eq.(2) considering Eq.(1). In that case, it is evident that the complexity of the effective refractive index would be higher than that of the expression found by SR. On the other hand, Fig.(2) shows that the predictions made by SR Eq. (3) are indistinguishable from those of MG. This fact is confirmed in Figs.(2-b,c), where we depict the transmittance and reflectance spectra generated using Fresnel equations. The previous result shows that it is possible to establish, from spectral information, a closed-form model for the optical properties of a complex structure.

Due to the nature of the method, there are no evident limitations to extend the potential of SR into the study of more complex configurations. Work considering other materials, the dependance on more physical parameters, and situations where MG theory is no longer valid (multiple scattering) are currently under exploration.

5. Acknowledgements

This work has been made within the framework of the Graduate School NANO-PHOT (École Universitaire de Recherche, PIA3, contract ANR-18-EURE-0013)

6. Bibliography

- [1] Sanchez, C., Arribert, H. & Giraud Guille, M. Biomimetism and bioinspiration as tools for the design of innovative materials and systems. *Nature Mater* 4, 277–288 (2005)
- [2] Blanchard-Dionne, A. P. and Martin O. J. F., "Teaching optics to a machine learning network," *Opt. Lett.*, Vol. 45, No. 324, 2922—2925, 2020
- [3] R. Koza, *Genetic programming - on the programming of computers by means of natural selection.*, Complex adaptive systems, MIT, 1993.
- [4] Sierra-Vélez, J., Macias, D., Vial, A., Giraldo, M.A. Retrieving the Refractive Index of a Biological Material via Symbolic Regression. *NBC 2023. IFMBE Proceedings*, vol 89. 2023
- [5] Syurik, J., Siddique, R. H., Dollmann, A. et al., "Bio-inspired, large scale, highly-scattering films for nanoparticle alternative white surfaces," *Scientific Reports*, Vol. 7, No. 1, 46637, 2017.

High frequency homogenization for periodic dispersive media

B. Vial¹, M. Touboul^{1,4}, R. Assier², S. Guenneau³ and R. V. Craster^{1,4}

¹ : Department of Mathematics, Imperial College London, UK

² : Department of Mathematics, University of Manchester, UK

³ : The Blackett Laboratory, Department of Physics, Imperial College London, UK

⁴ : UMI 2004 Abraham de Moivre-CNRS, Imperial College London, UK
 b.vial@imperial.ac.uk

Abstract

High-frequency homogenization is used to study dispersive media, containing inclusions placed periodically, for which the properties of the material depend on the frequency (Lorentz or Drude model with damping, for example). Effective properties are obtained near a given point of the dispersion diagram in frequency-wavenumber space. The asymptotic approximations of the dispersion diagrams, and the wavefields, so obtained are then cross-validated via detailed comparison with finite element method simulations in both one and two dimensions.

1. Introduction

Dispersive media have material properties that are frequency dependent and form an important and commonly occurring class of materials in physics, material science and engineering, they are of increasing importance in the design of advanced materials particularly in plasmonic. Classically, dynamic homogenization is understood as a low-frequency approximation to wave propagation in heterogeneous media. A particularly successful method, for periodic media, is the two-scale asymptotic expansion method and the notion of slow and fast variables [1]. The idea of high-frequency homogenization (HFH), introduced in [2], is to use similar asymptotic methods to approximate how the dispersion relation, and hence the media behave, near a given point in wavenumber-frequency space that satisfies the dispersion relation. Here we extend the HFH method to the case of dispersive media where the properties of the material depend on the frequency; this is not a routine extension as the dispersion curves are now complex and additional complications due to the frequency dependence, including resonances, now occur.

2. Results

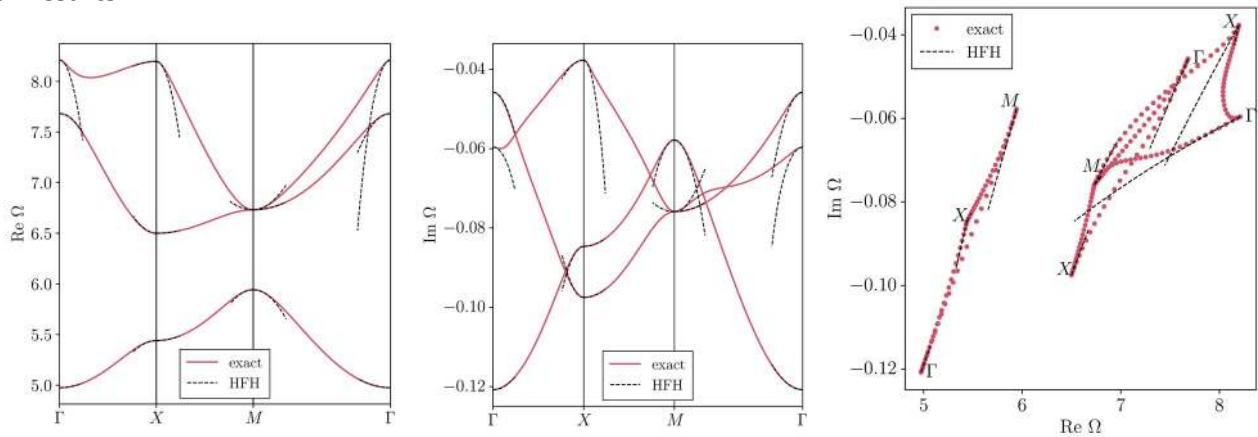


Figure 1. Simple eigenvalue HFH approximations (dashed lines) for the first three bands of the square photonic crystal in TM polarization

We consider here a two-dimensional lattice of dispersive rods as studied in [3], with permittivity ϵ given by a single resonance Drude model $\epsilon(\Omega) = 1 - \Omega_p^2 / (\Omega(\Omega + i\gamma))$, with $\Omega_p / 2\pi = 1.1$, $\gamma / 2\pi = 0.05$, and non magnetic material with permeability $\mu = 1$. The first example is a square array of period h

of square rods of size $L = 0.806h$ made of this Drude permittivity in vacuum. The results obtained by HFH well the dispersion behaviour locally around the symmetry points. The spectral features showing deformed triangles in the complex plane and including an intertwining of the second and third band is well recovered by the HFH asymptotic approximations (see Fig. 1).

Next, our focus is the cluster of four eigenfrequencies along ΓX close to the point Γ : the results of FEM computations are displayed on Fig. (2). The exact dispersion curves (solid lines) are correctly approximated by the single eigenvalue HFH model (dashed curves), and even better so by the nearby case (dotted lines). Indeed the nearby approximation leads to a better prediction of the local behaviour of bands, and this is particularly striking for the imaginary parts.

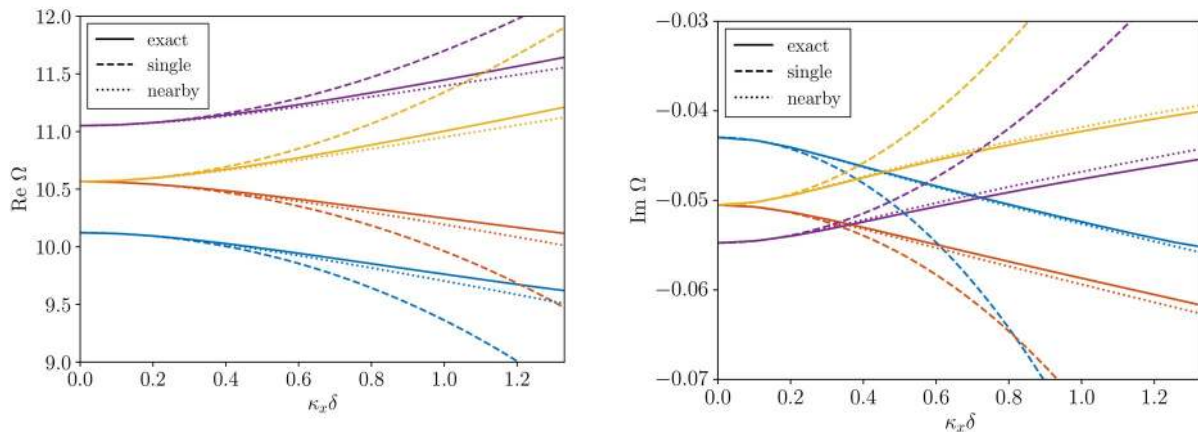


Figure 2. Comparison of the exact dispersion relation approximated by FEM (solid lines) and the effective one obtained by HFH for the single eigenvalue case (dashed lines) and with nearby approximations (dotted lines).

3. Conclusion

In this contribution, we were able to develop an approximation for both the dispersion diagram and the envelope function which defines the wavefield at the zeroth order. These asymptotic approximations come with an effective parameter or tensor that encapsulates the dispersive properties of the considered material. The results have been validated using comparisons with Finite Element Simulations for different configurations.

4. Acknowledgments

This work was supported by EPSRC grant No. EP/R014604, the H2020 FET-proactive MetaVEH project under grant No. 952039 and UKRI grant No. 10033143.

5. Bibliography

- [1] Alain Bensoussan, Jacques-Louis Lions, and George Papanicolaou. *Asymptotic analysis for periodic structures*, volume 374. American Mathematical Soc., 2011.
- [2] R. V. Craster, J. Kaplunov, and A. V. Pichugin. High-frequency homogenization for periodic media. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 466(2120), pp. 2341–2362, 2010.
- [3] Yoann Brûlé, Boris Gralak, and Guillaume Demésy. Calculation and analysis of the complex band structure of dispersive and dissipative two-dimensional photonic crystals. *JOSA B*, 33(4):691–702, 2016.

Propagation d'ondes électromagnétiques hautes fréquences dans des milieux bianisotropes hétérogènes dispersifs

J.-L. Akian¹, É. Savin²

¹ : ONERA/DMAS, Châtillon

² : ONERA/DTIS, Palaiseau
eric.savin@onera.fr

Résumé

Nous présentons un modèle mathématique de propagation d'ondes électromagnétiques (vectorielles) à hautes fréquences dans un milieu diélectrique bianisotrope aléatoirement hétérogène. Les « hautes fréquences » correspondent à la situation où la longueur d'onde est comparable à la longueur de corrélation des inhomogénéités aléatoires, lorsque de fortes interactions se produisent entre les ondes et le milieu de propagation. Nous établissons les équations de transport et de transfert radiatif pour les densités d'énergie électromagnétique associées aux différentes polarisations possibles des ondes. Notre analyse étend des résultats existants afin de tenir compte de l'hétérogénéité du milieu de propagation moyen et des couplages éventuels des différentes polarisations. Elle est fondée sur l'interprétation de la transformée et de la mesure de Wigner des ondes électromagnétiques, permettant de caractériser leur densité d'énergie dans l'espace des phases, en termes d'opérateurs pseudo-différentiels semi-classiques dans leur quantification standard.

1. Introduction

L'analyse de la propagation d'ondes électromagnétiques dans des milieux complexes a un intérêt pour un large éventail d'applications, notamment l'imagerie radar et la télédétection, l'imagerie optique, la physique atmosphérique, ou les communications entre autres. Comme la complexité des milieux de propagation ne peut pas être décrite exactement mais seulement évaluée dans un sens statistique, nous modélisons leurs inhomogénéités (ou imperfections) sous forme de champs aléatoires et considérons ainsi les équations de Maxwell avec des paramètres électromagnétiques fluctuant de manière aléatoire. Cette approche concerne les guides d'ondes constitués de matériaux diélectriques présentant de nombreuses imperfections, les atmosphères et les nuages, les suspensions colloïdales, les tissus biologiques ou encore les plasmas, qui sont le type de milieux auxquels nous pensons plus particulièrement dans cette recherche.

Les méthodes asymptotiques peuvent être utilisées pour caractériser à la fois quantitativement et qualitativement les champs d'ondes lorsque certaines échelles explicites peuvent être identifiées et séparées pour décrire les régimes de propagation correspondants. Des travaux mathématiques récents sur les ondes électromagnétiques dans des milieux aléatoires ont considéré des demi-espaces stratifiés [5], des guides d'ondes [2], ou des environnements ouverts [3], par exemple. Dans ces travaux, une direction de propagation privilégiée peut être identifiée et le champ électromagnétique peut être décomposé en ondes planes transversales à cette direction. Leurs amplitudes sont des champs aléatoires dont l'évolution est pilotée par les fluctuations aléatoires des paramètres diélectriques, et peuvent être étudiées dans différents régimes asymptotiques. Par exemple, les effets de diffusion cumulés induits par de faibles inhomogénéités à de grandes distances de propagation dans un guide d'onde se manifestent généralement par la décroissance exponentielle des champs moyens, l'augmentation de leurs fluctuations aléatoires, et la dépolarisation.

2. Travaux réalisés

Dans nos recherches, nous étudions plutôt la situation dans laquelle aucune direction de propagation privilégiée ne peut être identifiée au préalable, les ondes se propagent dans des milieux aléatoires ouverts. La longueur d'onde et la longueur de corrélation des fluctuations aléatoires des paramètres électromagnétiques sont petites et comparables, tandis que la distance de propagation et/ou la durée d'observation sont grandes. L'amplitude des fluctuations aléatoires est également faible. Ce *scaling* « haute fréquence » est pertinent si l'objectif est par exemple d'imager des inhomogénéités à partir de capteurs

distants. Dans ce contexte, les ondes sont diffusées par les inhomogénéités lorsqu'elles se propagent dans toutes les directions, et leur polarisation et leur phase sont randomisées. On sait alors que la densité d'énergie des ondes est la quantité pertinente à analyser. Elle peut être évaluée à partir de la transformée de Wigner du champ d'onde et de sa limite « haute fréquence », la mesure de Wigner associée qui est une quantité positive caractérisant la densité d'énergie dans l'espace des phases [6]. L'évolution de la mesure de Wigner est décrite par des équations de transfert radiatif avec des opérateurs collisionnels linéaires dont les noyaux dépendent de la structure de corrélation des inhomogénéités [7]. En fait, les seules informations nécessaires pour rendre compte des fluctuations des paramètres électromagnétiques sont leurs densités spectrales de puissance, c'est-à-dire les transformées de Fourier spatiales de leurs fonctions d'auto-corrélation. Ces équations de transfert radiatif pour les ondes vectorielles électromagnétiques ont déjà été obtenues dans [7] pour des fluctuations aléatoires dans des milieux isotropes, puis dans [4] pour des fluctuations aléatoires dans des milieux bianisotropes non dissipatifs avec des paramètres moyens constants. Nous avons étendu ces résultats à des équations constitutives très générales, pour des matériaux hétérogènes ayant des propriétés dispersives et dissipatives [1]. Pour cela nous nous sommes appuyés sur l'interprétation de la transformée de Wigner en termes d'opérateurs pseudo-différentiels semi-classiques en choisissant la même quantification pour les deux opérations. Ce choix simplifie sensiblement l'analyse par rapport à d'autres approches où la transformée de Wigner et les opérateurs considérés peuvent avoir des quantifications différentes.

3. Perspectives

Les équations de transfert radiatif ont une interprétation géométrique directe en termes de courbes bicaractéristiques, c'est-à-dire de rayons dans l'espace des phases, qui sont similaires aux rayons de la méthode des rayons classique (ou optique géométrique). Cette approche est applicable à la simulation de radar à synthèse d'ouverture (SAR) par exemple, y compris la prise en compte des trajets multiples en imagerie radar, télédétection, ou pour le calcul des fonctions de transfert d'antennes en milieux hétérogènes, et ce chaque fois que les approximations de l'optique géométrique tiennent. Des solveurs de lancer de rayons sont alors requis, tels que ceux qui ont été développés ces dernières années en infographie par exemple. Une des applications possibles de ces travaux concerne l'extension de ces solveurs pour le lancer de rayons dans l'espace des phases et dans des milieux complexes tels que des plasmas. Les algorithmes et applications mis en œuvre dans l'industrie du jeu vidéo, entre autres, pourraient ainsi être réutilisés dans le contexte de l'électromagnétisme numérique.

6. Bibliographie

- [1] Akian JL and Savin É, Wigner measures of electromagnetic waves in heterogeneous bianisotropic media, arXiv:2309.14223, 2023.
- [2] Alonso R and Borcea L, Electromagnetic wave propagation in random waveguides, *SIAM Multiscale Model. Simul.*, vol. **13**, pp. 847-889, 2015.
- [3] Borcea L and Garnier J, Polarization effects for electromagnetic wave propagation in random media, *Wave Motion*, vol. **63**, pp. 179-208, 2016.
- [4] Fannjiang A, Two-frequency radiative transfer: Maxwell equations in random dielectrics, *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. **24**, pp. 3680-3690, 2007.
- [5] Garnier J and Sølna K, Transmission and reflection of electromagnetic waves in randomly layered media, *Commun. Math. Sci.*, vol. **13**, pp. 707-728, 2015.
- [6] Gérard P, Markowich PA, Mauser NJ, and Poupaud F, Homogenization limits and Wigner transforms, *Comm. Pure Appl. Math.*, vol. **L**, pp. 323-379, 1997.
- [7] Ryzhik LV, Papanicolaou GC, and Keller JB, Transport equations for elastic and other waves in random media, *Wave Motion*, vol. **24**, pp. 327-370, 1996.

Reconfigurable Intelligent Surfaces: A Practical Scattering Model Based on Green’s Theorem

Hussein Ezzeddine¹, Abdelwaheb Ourir¹, Julien de Rosny¹

¹: ESPCI Paris, Université PSL, CNRS, Institut Langevin, 75005 Paris, France
hussein.ezzeddine@espci.fr

Abstract

This paper presents the development of a novel communication model for reconfigurable intelligent surface (RIS)-assisted wireless systems, utilizing a 2D formulation of electromagnetic (EM) fields based on Green’s theorem. Specifically, we establish a direct relationship between the scattered field and the current and impedance of the scattering antenna. The model successfully explains the various diffraction orders present in the scattered field. The presented communication model offers valuable insights for RIS-assisted wireless systems, paving the way for improved system design and performance optimization.

1. Introduction

Reconfigurable intelligent surfaces (RISs) constitute a new technology that allows controlling wireless propagation environments. It includes programmable unit cells that can manipulate electromagnetic waves to create smart radio environments [1]. However, optimizing RIS-aided wireless systems require realistic and accurate communication models that account for the physics and electromagnetic (EM) properties of the scattering elements and wave transformations [2]. To date, only a few EM-compliant models for RIS-assisted wireless systems are available [3]-[6], and they only address specific issues in isolation. This work introduces a new physics-based scattering model for RIS-assisted wireless systems that adheres to the laws of electromagnetism. The proposed model explicitly relates the scattered field to the current and impedance of the scattering elements and produces a tractable expression of the total impedance that can be incorporated in the solution of the wave equation.

2. 2D RIS Model Based on Green’s Theorem

The proposed RIS model is based on the infinite thin wire antenna concept. Figure 1 shows the 2D RIS model where the wire antennas are represented by point scatterers and the ground plane effect is emulated via image theory. The scattering antennas are separated by an inter-distance of 0.61λ to minimize coupling. The angles of incidence and reflection are denoted by θ_{in} and θ_{out} respectively, and the targeted angle of reflection is denoted by $\bar{\theta}_{out}$.

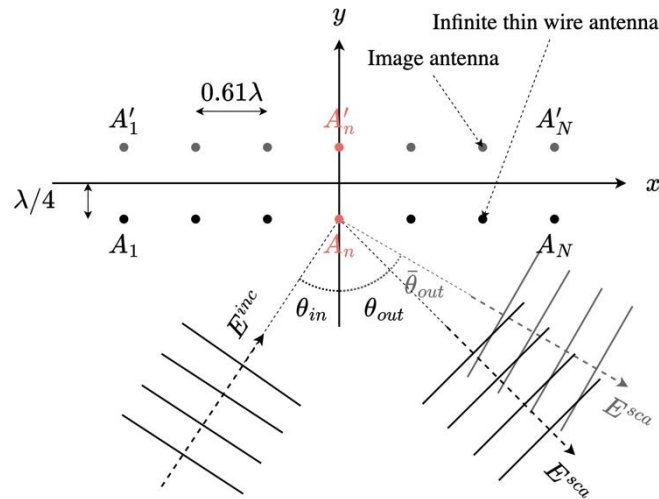


Figure 1. 2D RIS model based on infinite thin wire antenna and image theory.

The EM field scattered by the RIS is obtained using the tangential component of the electric field $E_z(x, y)$ satisfying the 2D wave equation. Since the latter is a linear differential equation, its solution can be expressed using Green's function, $G(x, y) = -\frac{j}{4}H_0^{(2)}(k\rho)$, where $H_0^{(2)}$ is a Hankel function of the second kind and $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ is the Euclidian distance in the 2D space. For an incident field E_n^{inc} , a scattering antenna is treated as a point source carrying a current I . Hence, the scattered field is expressed as

$$E_{z(x,y)} = -\frac{\omega \mu}{4} H_0^{(2)}(k\rho) I = -z(\rho)I,$$

where ω is the angular frequency and μ is the permeability. $z(\rho)$ is defined as the impedance per unit length parameter, which consists of the self and mutual impedances.

In the case of a multiple scattering antennas illuminated by an incident plane wave, the currents and voltages of the system can be related using the following expression

$$E_n^{inc} = -(z_A + z_{L_n}) + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^N z_{nm} I_m,$$

where z_A , z_{L_n} , and z_{nm} are the self, load, and mutual impedances per unit length respectively. This expression allows calculating the currents in all the scattering antenna elements; which thus leads to computing the scattered E-field at all points of a given geometry.

3. Numerical Simulation Results

Figure 2 illustrates a 2D color map representation of the plane wave decomposition along a horizontal line at 5λ distance from the RIS. This decomposition shows marked traces with different intensities corresponding to the different orders of diffraction suffered by the scattered field. These diffraction orders are due to specular reflection, the periodicity of the scattering elements, and the periodicity of the phase law programmed on these elements to achieve the desired reflection angle. The marked traces explain the distribution of the set of obtained reflection angles θ_{out} as a function of the programmed angle $\bar{\theta}_{out}$.

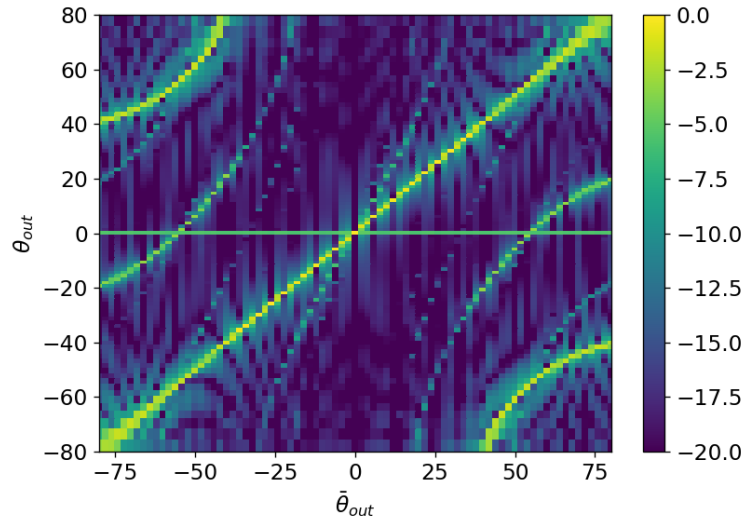


Figure 2. 2D color map representation of the plane wave decomposition of the scattered field along the horizontal line ($y = -5\lambda$) as a function of $\bar{\theta}_{out}$ for $\theta_{in} = 0$.

4. Conclusion

In this work, we developed a new communication model for RIS-assisted wireless systems based on a 2D formulation of EM fields using Green's theorem. The proposed 2D model is simple yet accurate and compliant to the laws of electromagnetism for the generation, propagation, and scattering of EM fields. Particularly, we explicitly relate the scattered field to the current and impedance of the scattering antenna, and produce a tractable expression of the total field scattered by the RIS. Furthermore, the model is used to explain the different orders of diffraction present in the scattered field, which impact the overall performance of the system.

6. Bibliographie

- [1] Di Renzo M et al., Smart Radio Environments Empowered by Reconfigurable Intelligent Surfaces: How It Works, State of Research, and The Road Ahead, *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 38, pp. 2450-2525, 2020.
- [2] Di Renzo M, Danufane F H, and Tretyakov S, Communication models for reconfigurable intelligent surfaces: From surface electromagnetics to wireless networks optimization, *Proc. IEEE*, vol. 110, no. 9, pp. 1164-1209, 2022.
- [3] Tang W et al., Wireless Communications With Reconfigurable Intelligent Surface: Path Loss Modeling and Experimental Measurement, *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 20, no. 1, pp. 421-439, 2021.
- [4] Danufane F H, Di Renzo M, De Rosny J, and Tretyakov S, On the Path-Loss of Reconfigurable Intelligent Surfaces: An Approach Based on Green's Theorem Applied to Vector Fields, *IEEE Trans. Commun.*, vol. 69, no. 8, pp. 5573-5592, 2021.
- [5] Abeywickrama S, Zhang R, Wu Q, and Yuen C, Intelligent reflecting surface: Practical phase shift model and beamforming optimization, *IEEE Trans. Commun.*, vol. 68, no. 9, pp. 5849-5863, 2020.

Faisceaux non diffractifs pour les liaisons sans fil RF opérant dans la région de Fresnel

Ravel C. M Pimenta¹, Gabriel Soriano¹, Konstantinos Paschaloudis², Matthieu Bertrand³,
Mauro Ettore², Myriam Zerrad¹, Claude Amra¹

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

² : Univ Rennes, CNRS, IETR-UMR 6164, F-35000 Rennes, France

³ : Thales Research & Technology, Palaiseau, France

pimenta@fresnel.fr

Résumé

L'objectif de cette étude est d'analyser l'utilisation d'ondes non diffractives, telles que les faisceaux de Bessel, pour réduire la perte dite du trajet en espace libre dans les liaisons sans fil radiofréquences opérant dans la région de Fresnel. Nous commençons par examiner le comportement non diffractif des faisceaux de Bessel, et leur propriété d'autoréparation en cas d'obstruction partielle de la liaison. Ensuite, nous analysons l'efficacité du transfert de puissance entre deux antennes à ouverture rayonnante planaire pour des faisceaux de Bessel avec différentes constantes de propagation. Ce projet fait partie du projet ANR LinkAll, une collaboration entre l'Institut d'Electronique et des Technologies du Numérique (IETR), l'Institut Fresnel et Thales Research and Technology

1. Introduction

Les faisceaux de Bessel [1] sont un type particulier de faisceau qui ne subit pas de diffraction en cours de propagation en espace libre et possède une propriété appelée autoréparation [2]. Dans les applications pratiques, ces faisceaux conservent leurs caractéristiques non diffractives dans une région limitée du champ proche [3].

Dans le régime optique, les faisceaux de Bessel trouvent de nombreuses applications telles que le traitement des matériaux et la tomographie par cohérence optique [3]. Dans le régime micro-ondes, ils apparaissent comme une solution intéressante pour surmonter la perte de trajet en espace libre [4], car elle est principalement causée par la diffraction électromagnétique des champs. L'objectif de ce travail est d'explorer les caractéristiques du faisceau de Bessel, plus précisément sa capacité d'autoréparation et l'efficacité du transfert de puissance.

Notre travail se concentre sur l'utilisation de grandes ouvertures rayonnantes ayant des rayons égaux ou supérieurs à 50λ , où λ représente la longueur d'onde dans le vide à la fréquence de fonctionnement. L'objectif est de créer une liaison sans fil opérant à des distances supérieures à 4000λ , soit plus de 40 fois la taille des ouvertures. Ces dimensions justifient le recours à l'approximation paraxiale dans nos formulations [5].

2. Simulation numérique

Pour analyser les propriétés d'autoréparation, nous étudions un système composé d'une ouverture rayonnante circulaire et d'un obstacle constitué d'un conducteur électrique parfait (PEC). L'obstacle est un disque circulaire aligné axialement avec la source et le problème est analysé en utilisant une approche de champ diffusé. La distribution tangentielle du champ électrique sur l'ouverture est décrite par une fonction de Bessel de premier type et première ordre : $E_t = J_1(k_\rho \rho)\beta$ où k_ρ est la constante de propagation transversale du faisceau et ρ la variable radiale.

Pour évaluer l'efficacité du transfert de puissance, nous examinons un système composé de deux ouvertures circulaires coaxiales. L'analyse est effectuée en considérant différentes valeurs de k_ρ . En champ proche, l'équation de Friis n'est plus valable. Pour le transfert de puissance, nous utilisons la formule plus générale [6], qui repose sur la réaction électromagnétique entre les sources. Dans cette étude, et suivant [3], la réaction est obtenue en considérant que le champ rayonné par une ouverture n'est pas perturbé par l'autre ouverture.

3. Résultats

Les résultats de simulation de l'efficacité de transfert de puissance, du contenu spectral et de l'autoréparation sont présentés dans Fig. 1. Dans toutes les simulations, le rayon de l'ouverture rayonnant est 50λ , la fréquence d'opération 30 GHz et le rayon de l'obstacle 10λ .

Nous vérifions que le contenu spectral du faisceau est concentré sur deux pics localisés à la valeur de la constante de propagation transverse. Nous constatons également que le transfert de puissance est plus efficace pour les plus petits nombres d'ondes transversales. Concernant l'autoréparation, nous observons la régénération de l'intensité du champ au sortir d'une zone d'ombre localisée après l'obstacle. Nous notons bien sûr une zone d'ondes stationnaires entre la source et l'obstacle.

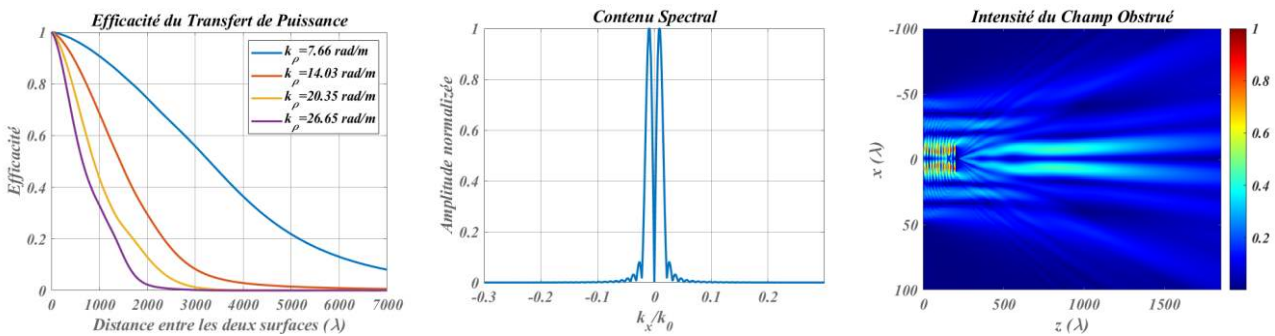


Figure 1. Résultats des simulations pour l'efficacité, le contenu spectral et l'autoréparation

4. Conclusion

Dans ce travail, nous avons étudié les faisceaux de Bessel du point de vue de leur faculté d'autoréparation et de leurs performances lors d'un transfert de puissance. Nous avons observé avec succès l'autoréparation des faisceaux de Bessel en utilisant une formulation en champ diffusé. Nous avons pu constater qu'il y a une ombre projetée après l'obstacle, suivie d'une reconstruction progressive de l'intensité du champ. Notre exploration s'est étendue à l'analyse de l'efficacité du transfert de puissance, révélant que l'utilisation de la plus petite constante de propagation transverse entraîne une plage opérationnelle plus large.

5. Remerciements

Cette recherche est financée par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) dans le cadre du projet LinkAll (ANR-21-CE25-0014) et par le du programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne dans le cadre de la bourse Marie Skłodowska-Curie n° 899546.

6. Bibliographie

- [1] J. Durnin, Exact solutions for nondiffracting beams. I. the scalar theory, *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. **4**, pp. 651-654, 1987.
- [2] D. McGloin and K. Dholakia, Bessel beams: diffraction in a new light, *Contemp. Phys.*, vol. **46**, pp. 15-28, 2005.
- [3] R. C. M. Pimenta et. al, Power transfer efficiency for obstructed wireless links using bessel beams, *Opt. Express*, vol. **31**, pp. 35493-35506, 2023.
- [4] M. Ettorre and A. Grbic, Generation of propagating bessel beams using leaky-wave modes, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. **60**, pp. 3605-3613, 2012.
- [5] F. Alsolamy, W. A. Alomar, and A. Grbic, Cylindrical vector beams for wireless power transfer, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. **69**, pp. 1716-1727, 2021.
- [6] M.-K. Hu, Near-zone power transmission formula," I, *IRE Nat'l Conv.*, vol. **6**, pp. 128-135, 1958.

Étude de la dynamique des corrélations de densité d'atomes froids dans un speckle optique, du régime diffusif à la transition d'Anderson

J.-P. Banon¹, V. Josse¹, A. Aspect¹, D. Delande², N. Cherroret²

¹ : *Laboratoire Charles Fabry, Institut d'Optique, CNRS, Université Paris-Saclay, 91127 Palaiseau cedex, France,*

² : *Laboratoire Kastler Brossel, Sorbonne Université, CNRS, ENS-PSL Research University, Collège de France, 4 Place Jussieu, 75005 Paris, France
jean-philippe.banon@institutoptique.fr*

Résumé

Dans cette contribution, nous présentons un panorama de nos résultats de simulation numérique d'atomes froids de rubidium se propageant dans un speckle optique et nous les comparons aux résultats expérimentaux obtenus dans l'équipe dans une expérience visant à observer la transition d'Anderson à trois dimensions. Ensuite nous présentons nos premiers résultats théoriques sur l'étude de l'évolution temporelle des corrélations de densité afin de comprendre les signatures que ces corrélations peuvent porter sur la transition d'Anderson en étudiant leur comportement du régime diffusif au régime localisé.

1. Introduction

La localisation d'Anderson, ou l'absence de diffusion des ondes dans un environnement désordonné, est un phénomène surprenant de la physique des ondes qui a pour origine l'interférence des ondes diffusées de multiples fois dans le milieu diffusant. La localisation d'Anderson fut observée pour divers types d'ondes, telles que les ondes acoustiques, les micro-ondes, ou encore les ondes quantiques de matière. Les expériences d'atomes ultra-froids représentent une plateforme idéale pour l'étude de la localisation d'Anderson, et de la transition entre un régime de diffusion et de localisation se produisant à une énergie critique, le seuil de mobilité, en 3D. La localisation d'atomes froids dans un speckle optique désordonné fut d'abord observée à une dimension d'espace [1] puis à trois dimensions dans une série d'expériences, donnant des estimations toujours plus précises du seuil de mobilité [2, 3, 4]. Récemment, notre équipe a observé une transition abrupte dans l'étalement de paquets d'onde résolus en énergie avec une énergie critique en excellent accord avec les prédictions numériques les plus abouties du seuil de mobilité [5].

2. Diffusion et localisation d'atomes froids de rubidium dans un speckle optique

Afin de mieux comprendre la transition d'Anderson et en complément des mesures expérimentales, nous étudions ici les propriétés spectrales et la dynamique d'atomes froids de rubidium se propageant dans un speckle optique 3D, au plus proche des conditions expérimentales réalisées au laboratoire Charles Fabry. Ceci nécessite (i) la modélisation du speckle optique, (ii) le calcul des fonctions spectrales pour différentes amplitudes du potentiel, (iii) la détermination du seuil de mobilité, (iv) la simulation de l'évolution temporelle du gaz d'atomes chargée à diverses positions spectrales par rapport au seuil de mobilité. Dans cette contribution, nous expliquerons les étapes de ce travail en les illustrant avec des comparaisons entre théorie et expérience.

3. Corrélations de densité du régime diffusif au régime localisé

Dans la recherche de signatures de la transition d'Anderson alternatives à l'étude de l'étalement d'un paquet d'onde et à titre exploratoire, nous nous intéressons aux corrélations de densité. Dans le régime diffusif, les corrélations de densité sont connues pour comporter un terme de courte portée, caractéristique des fluctuations spatiales de l'onde de matière à l'échelle de la longueur d'onde de De Broglie, et un terme de longue portée dépendant du temps portant l'information de croisements de chemins de diffusion au cours du transport [6]. Dans le régime localisé, nous nous attendons intuitivement à ce que ce dernier terme devienne exponentiellement faible avec la distance et caractérise la longueur de localisation. Nous présenterons nos premiers résultats théoriques et

numériques sur l'étude de l'évolution temporelle de ces corrélations de densité.

4. Bibliographie

- [1] J. Billy, V. Josse, Z. Zuo, A. Bernard, B. Hambrecht, P. Lugan, D. Clément, L. Sanchez-Palencia, P. Bouyer, and A. Aspect, *Nature*, **453**, 891 (2008).
- [2] S.S. Kondov, W.R McGehee, J. J Zirbel, J. J. and B. DeMarco, *Science* **34**, 66 (2011).
- [3] F. Jendrzejewski, A. Bernard, K. Muller, P. Cheinet, V. Josse, M. Piraud, L. Pezzé, L. Sanchez-Palencia, A. Aspect and P. Bouyer, *Nature Physics*, **8**, 398 (2012).
- [4] G. Semeghini, M. Landini, P. Castilho, S. Roy, G. Spagnolli, A. Trenkwalder, M. Fattori, M. Inguscio and G. Modugno, *Nature Physics*, **11**, 554 (2015)
- [5] D. Delande and G. Orso, *Physical Review Letters*, **113**, 060601 (2014).
- [6] E. Akkermans and G. Montambaux, *Mesoscopic Physics of Electrons and Photons* (Cambridge University Press, Cambridge, 2007).

Outil logiciel de modélisation de nanostructures photoniques SimPhotonicsFMM Matlab Toolbox

M. Besbes, C. Sauvan

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

Résumé

Ce papier présente les caractéristiques d'une « toolbox » développée en environnement Matlab pour modéliser des nanostructures photoniques et plasmoniques disposées en réseau périodique avec la méthode modale de Fourier (ou RCWA). Elle s'appuie sur la superformule de Gielis pour la génération des formes des structures.

1. Introduction

Les outils logiciels dédiés à la simulation de micro et nanostructures photoniques en réseau périodique, qu'ils soient libres ou propriétaires, répondent à de nombreux besoins, aussi bien dans le monde académique que chez les industriels. Le choix entre ces outils se fait généralement en fonction de plusieurs critères, entre autres la rapidité du calcul et la simplicité d'utilisation. Ces deux critères sont au cœur du développement de la « toolbox » SimPhotonicsFMM qui s'appuie sur la Méthode Modale de Fourier (également connue sous le nom Rigorous Coupled Wave Analysis) [1,2].

Pour générer les formes de nanoparticules, SimPhotonicsFMM utilise la formule de Gielis [3] qui permet de décrire des formes aussi variées que complexes avec seulement six paramètres. Cela permet de réduire le nombre de paramètres géométriques à prendre en compte lors d'une optimisation ou de l'apprentissage d'un réseau de neurones profond (deep learning). En effet, il est possible de générer des formes variées et complexes sans passer par une discrétisation de la cellule du réseau dans laquelle on associe un indice de réfraction potentiellement différent à chaque pixel.

2. Description de SimPhotonicsFMM Matlab Toolbox

SimPhotonicsFMM est une boîte à outils Matlab utile pour la simulation de structures micro et nanophotoniques. Elle est basée sur la méthode de Fourier modale qui peut être utilisée pour modéliser des structures multicouches, des métamatériaux/métasurfaces périodiques 1D et 2D [4]. SimPhotonicsFMM comprend une fonctionnalité spécifique qui permet la génération de la forme des nanostructures par l'utilisation de la super-formule de Gielis [3]:

$$r(\varphi) = \left(\left| \frac{\cos\left(\frac{m\varphi}{4}\right)}{a} \right|^{n_2} + \left| \frac{\sin\left(\frac{m\varphi}{4}\right)}{b} \right|^{n_3} \right)^{-\frac{1}{n_1}}$$

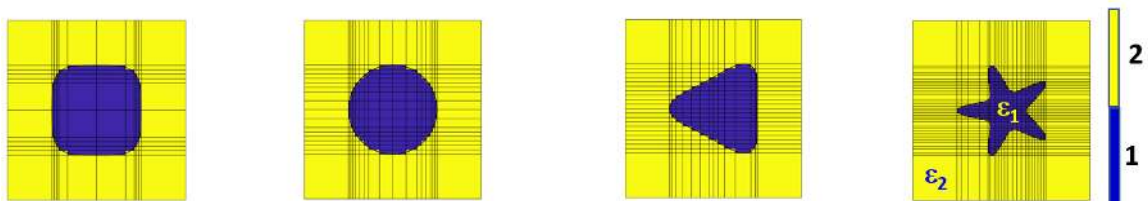
Cette formule permet de décrire une forme complexe en coordonnées polaires grâce à 6 paramètres : a, b, m, n₁, n₂, n₃. La figure 1 montre quatre exemples de formes différentes ainsi que les valeurs des paramètres associés.

Grâce à ses fonctionnalités avancées, SimPhotonicsFMM est une ressource précieuse pour les chercheurs et les ingénieurs travaillant dans le domaine de la micro/nanophotonique. Parmi les fonctionnalités de ce code on peut citer : le calcul de la réflexion, transmission et absorption de la lumière incidente (quelle que soit sa polarisation), la prise en compte des matériaux dispersifs, un temps de calcul réduit

avec une symétrie par rapport à un plan, le calcul accéléré d'un empilement périodique de couches minces (miroir de Bragg), la visualisation intuitive du champ, le calcul parallèle ...

Cette « toolbox » se présente comme une librairie de fonctions Matlab dont les principales sont :

- **SetGeom** : Définir les paramètres géométriques d'une nanoparticule à l'aide de la super-formule $\text{geom} = \text{SetGeom}('dx', \dots, 'dy', \dots, 'hc', \dots, 'mn', [m \ n1 \ n2 \ n3], 'ab', [a \ b], 'Param', Val)$ avec dx (resp. dy) période d'une cellule selon l'axe (Ox) (resp. (Oy), hc épaisseur des couches et les paramètres optionnels sont translation et rotation des nanoparticules ainsi que les coordonnées de points pour le calcul du champ.
- **Spectrum** : Calculer le spectre de réflectivité et de transmissivité en fonction de la longueur d'onde et/ou de l'angle d'incidence $[R_tm, T_tm, R_te, T_te] = \text{Spectrum}(\text{index}, \text{geom}, \text{lambda}, \text{theta}, \text{inc}, 'mx', \dots, 'my', \dots, 'Param', Val)$ Avec index tableau des indices de réfraction et inc = -1 incidence par le bas, +1 par le haut. Les paramètres mx et my sont le nombre de termes de Fourier en x et y.
- **Field** : Calculer la distribution du champ électromagnétique en tout point de l'espace $[E_tm, H_tm, E_te, H_te] = \text{Field}(\text{index}, \text{geom}, \text{lambda}, \text{theta}, \text{inc}, 'Param', Val)$



$[m, n_1, n_2, n_3] : 4 \ 4 \ 4 \ 4$

$4 \ 2 \ 2 \ 2$

$3 \ 6 \ 6 \ 6$

$5 \ 2 \ 7 \ 7$

Figure 1. Exemple de structures et paramètres associés utilisés dans la super-formule de Gielis. La discrétisation géométrique est exploitée pour attribuer les propriétés physiques à chaque cellule et pouvoir ainsi utiliser simplement les règles de factorisation des séries de Fourier.

4. Bibliographie

- [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] J. Gielis, "A generic geometric transformation that unifies a wide range of natural and abstract shapes", American Journal of Botany 90, 333 (2003).
- [4] <https://github.com/SimPhotonicsFMM/Sources>

Caractérisation hyperfréquence de systèmes multi-antennes sur porteur, à partir de mesures de Surface Equivalente Radar, et détermination du périmètre d'utilisation comparativement aux méthodes classiques

Combacau Olivier¹, Litman Amélie², Geffrin Jean-Michel², de Kat Jean¹

¹ CEA/CESTA Le Barp

² Institut Fresnel Marseille

jean.dekat@cea.fr

Résumé

Nous présentons les premiers résultats de caractérisation d'une antenne sous test, obtenus à partir d'une méthode alternative à la méthode classique de transmission à partir d'une antenne de référence.

Cette méthode consiste à utiliser une combinaison de plusieurs mesures de Surface Equivalente Radar (SER) d'un porteur équipé d'antennes, en faisant varier les impédances de charge en pied de chaque antenne. Elle permet non seulement d'obtenir les gains complexes de chacune des antennes, mais aussi d'autres caractéristiques comme la SER structurelle du porteur, les coefficients de réflexion sur chaque port et les couplages entre ports.

1. Introduction

La méthode de caractérisation usuelle d'antenne n'est pas toujours applicable sans difficulté de mise en œuvre, en particulier dans le cas d'antennes fortement intégrées dans une plateforme opérationnelle (avion etc.). Elle ne permet pas en outre facilement de remonter à toutes les caractéristiques complexes des antennes, comme le déphasage des gains par exemple. Dans le cas de systèmes antennaires complexes, les antennes peuvent en outre interférer les unes avec les autres. Ces phénomènes de couplages multiples entre antennes et avec le porteur sont naturellement exacerbés en basses fréquences

Il y a donc un réel intérêt à disposer d'une méthode alternative, plus simple à mettre en œuvre, moins intrusive, et plus complète.

Plusieurs travaux antérieurs ([1] par exemple) évoquent cette possibilité, dans des cas restreints et proposent des résolutions approximatives. Notre ambition est de résoudre le cas général multiports afin de déterminer le périmètre d'utilisation de cette méthode.

2. Description de la structure étudiée

Le changement des charges en pieds d'antennes modifie la SER du porteur équipé. A partir des variations de SER observables, il est théoriquement possible de remonter aux caractéristiques antennaires.

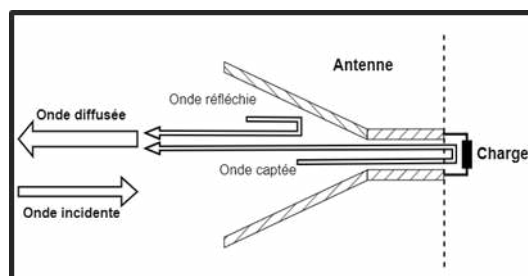


Figure 1. Comportement diffractif d'une antenne

La méthode se voulant peu intrusive, une commutation pilotée à distance (via des switches) des types de charge sur les ports antennes, est visée. Le simple ajout de switches en pieds d'antennes n'est

cependant pas anodin et fait basculer d’emblée la méthode dans le cadre des résolutions de problèmes matriciels non linéaires.

Le porteur équipé d’antennes est modélisable par un multipôle hyperfréquence. Le formalisme des paramètres S étendus est utilisé. Le porteur est ainsi totalement décrit par la matrice S_A qui relie les ondes captées/rayonnées dans les polarisations H et V d’un côté, aux ondes sortantes et entrantes sur chacun des ports de l’autre. Tous les termes de la matrice S_A dépendent de la fréquence. Certains termes de cette matrice dépendent en outre de l’angle d’incidence du porteur.

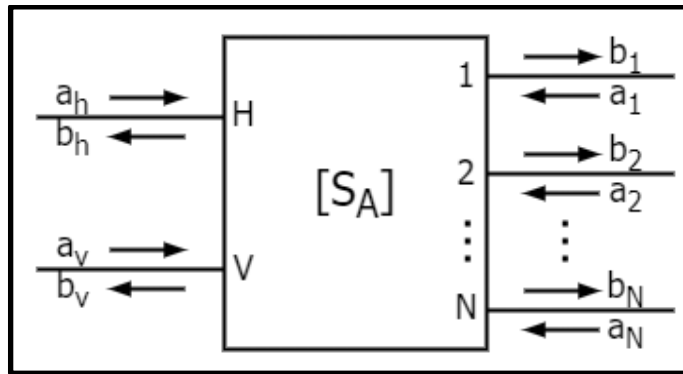


Figure 2. Modèle multipôle d’un système multi-antennes

Le travail consiste à évaluer le nombre et le type de mesures SER nécessaire, la précision requise, les jeux de charges optimaux ainsi que les algorithmes capables d’en extraire les termes de la matrice S_A . A partir de ces termes, on peut ensuite calculer toutes les caractéristiques souhaitées : SER « structurelle » du porteur, réflexion sur chacun des ports, couplage entre ports, et gain d’antenne associé à chaque port.

3. Résultats

Le poster présente des premiers résultats, obtenus pour un cas simple : la caractérisation d’un système multi-antenne à deux ports (i.e. comportant 2 antennes), à partir de mesures SER seulement.

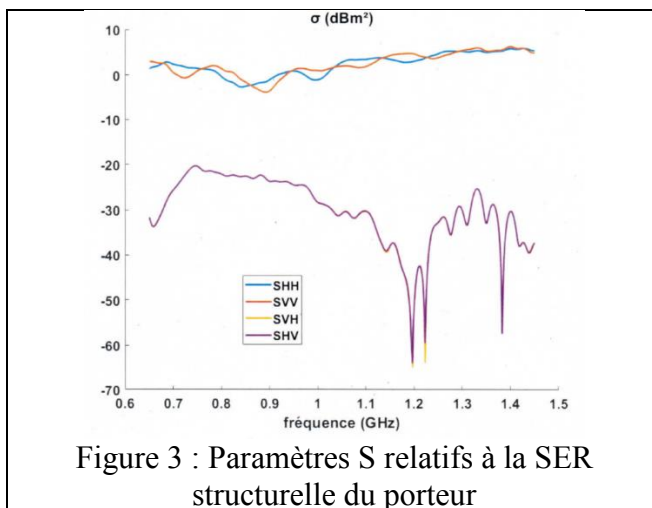


Figure 3 : Paramètres S relatifs à la SER structurelle du porteur

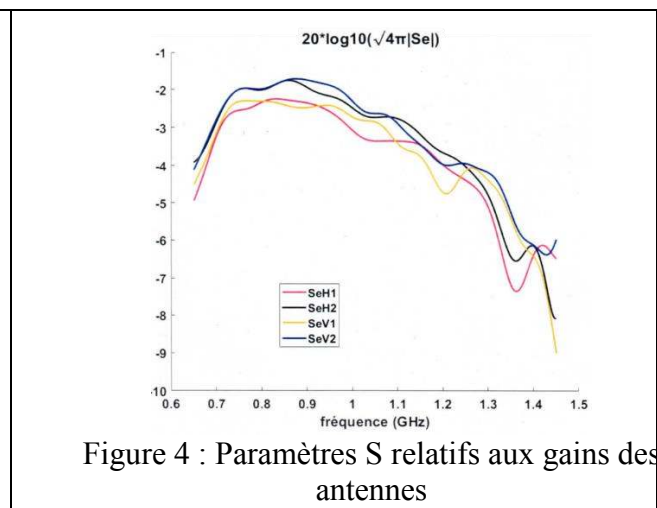
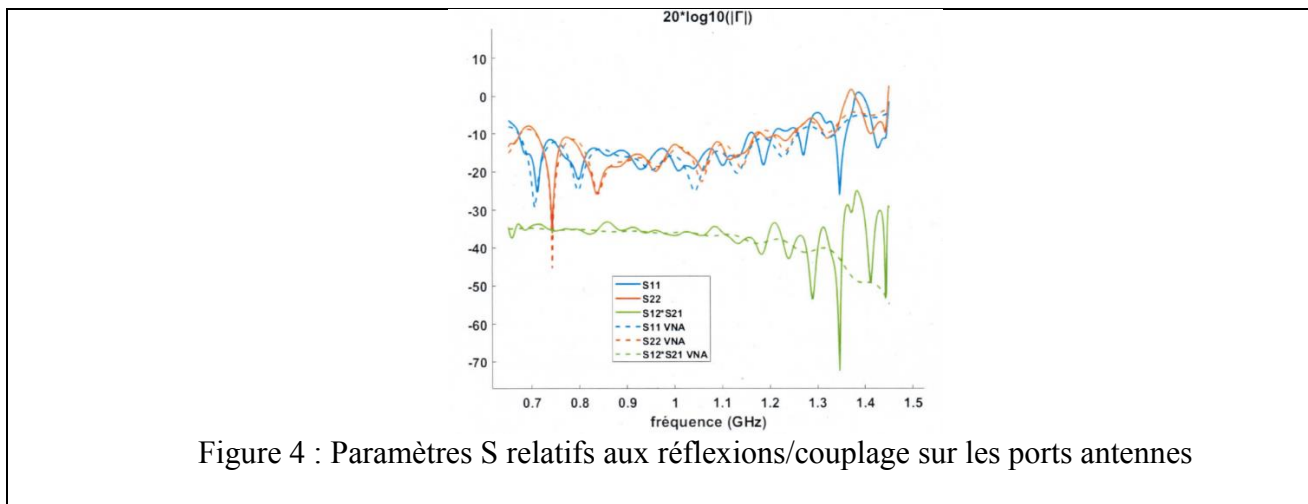


Figure 4 : Paramètres S relatifs aux gains des antennes



La figure 4 superpose les valeurs obtenues pour les réflexions/couplage, avec celles obtenues par mesure directe avec un VNA. Même le couplage entre ports (courbe verte), qui est pourtant faible (-35dB) a été correctement évalué, du moins jusqu'à 1.2GHz.

4. Conclusion

Dans cette première contribution, nous avons montré l'intérêt et la faisabilité sur un cas simple, de cette méthode alternative de caractérisation d'antennes intégrées sur porteur.

Notre ambition à terme est de résoudre un cas difficile, à partir d'une caractérisation complètement expérimentale, d'un porteur équipé d'antennes conformées, dans un domaine de fréquences où les diverses entités sont fortement couplées.

6. Bibliographie

[1] W. Wiesbeck and E. Heidrich, "Wide-band multiport antenna characterization by polarimetric RCS measurements," in *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 46, no. 3, pp. 341-350, March 1998, doi: 10.1109/8.662653. [3] VVV E, Title of contribution, *Abbreviated Title of Conference*, Proc. pp. n-m, City, Month and Year.

Posters GT2

Pompage topologique autour d'une symétrie glissée d'une chaîne phononique

J. A. Iglesias Martinez¹, M. Kadic¹, V. Laude¹, E. Prodan²

¹ : Université de Franche-Comté, CNRS, Institut FEMTO-ST, Besançon, France,

² : Department of Physics, Yeshiva University, New York, USA
vincent.laude@femto-st.fr

Résumé

Les métamatériaux reconfigurables peuvent passer d'une classe de symétrie à une autre au cours de leurs déformations. Nous introduisons ici le concept de l'amélioration singulière de la symétrie, qui se réfère à un saut abrupt vers une classe de symétrie supérieure qui est accompagné d'une réduction du nombre de bandes de dispersion pour les excitations du matériau (phonons). Ce phénomène entraîne la fermeture de certaines bandes interdites résonantes le long de variétés singulières dans un espace de paramètres. Nous démontrons que ces variétés singulières portent des charges topologiques. Comme exemple concret, nous montrons qu'une déformation d'un cristal acoustique qui encercle sans la rencontrer une symétrie glissée (groupe d'espace unidimensionnel $p11g$) d'une chaîne de résonateurs résulte en un cycle adiabatique qui porte un nombre de Chern non nul dans le volume, ce qui permet un pompage de Thouless des modes de bord.

1. Introduction

Il est reconnu que la symétrie spatiale des (méta)matériaux peut être une riche source d'effets topologiques. Par exemple, en chimie quantique topologique, les matériaux sont divisés en classes d'homotopie de telle sorte que deux systèmes appartenant à deux classes différentes ne peuvent être continuellement déformés l'un en l'autre sans combler une lacune spectrale globale ou briser les symétries d'espace associées aux classes. Des correspondances topologiques robustes entre le volume et les frontières peuvent être induites par des symétries d'espace dans des conditions de pompage adiabatique. Les symétries d'espace jouent également un rôle central dans les effets topologiques observés dans les isolants topologiques d'ordre supérieur et dans d'autres manifestations de la correspondance entre intérieur et frontières, comme dans les modes de coin topologiques, les vis sans fin topologiques ou les dislocations topologiques à vis.

Nous proposons le principe suivant lequel il est possible de produire des cycles topologiques sans faire appel à un modèle analytique de liaison étroite (*tight-binding model*) [1]. Ces cycles sont produits en utilisant uniquement des considérations géométriques. Le fait de se passer de tout calcul analytique peut avoir de grandes implications pratiques pour guider la conception de métamatériaux topologiques.

2. Description de la structure considérée

La chaîne de résonateurs acoustiques représentée figure 1 est composée de 'C' ou cavités résonantes de type Helmholtz plongées dans l'air. Les résonateurs sont inclus dans un guide d'onde qui 'ferme' les conditions aux limites, de sorte que le système peut être considéré comme passif et sans pertes. Les deux lignes de résonateurs sont décalées d'une distance g plus petite que la période a . Les résonateurs de chaque ligne subissent une rotation opposée d'un angle φ . Quand $g=a/2$, une symétrie glissée apparaît (groupe d'espace $p11g$) ; elle disparaît pour tout autre valeur du paramètre (groupe d'espace $p1$). Toutes les bandes sont dégénérées par paires en bord de zone de Brillouin pour le groupe $p11g$; au contraire une bande interdite s'ouvre pour le groupe $p1$ [2]. La valeur $\varphi=54^\circ$ conduit aux meilleures conditions géométriques pour cette ouverture.

L'idée est ensuite de décrire un lacet fermé faisant le tour du point isolé $p11g$ dans l'espace paramétrique (g, φ) sans jamais le toucher. Ainsi la métastructure reste toujours dans le groupe $p1$ mais une charge topologique apparaît, *quel que soit le lacet choisi*. La figure 2 montre la projection du spectre d'une chaîne finie de 62 résonateurs en fonction de la coordonnée angulaire ψ le long du lacet. La paramétrisation choisie est $\{g=a/2-a/5 \sin(\psi), \varphi=54^\circ+20^\circ\cos(\psi)\}$ ou φ est maintenant l'angle de

rotation des résonateurs du bas, les résonateurs du haut restant fixes à -54° . Des modes de bord naissent dans la bande interdite, localisés à droite ou à gauche de la chaîne. Par une variation adiabatique du paramètre ψ il est possible de passer continûment entre ces deux localisations, la transition intervenant autour du point (c) où le mode de bord est délocalisé tout au long de la chaîne.

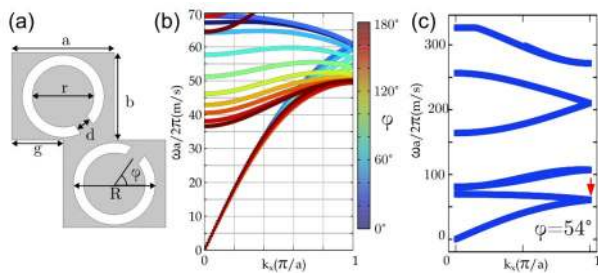


Figure 1. Une période élémentaire (a) d'une chaîne double de résonateurs acoustiques en 'C', pour laquelle les bandes (b-c) sont dégénérées en bord de zone de Brillouin pour $g=a/2$ (symétrie glissée).

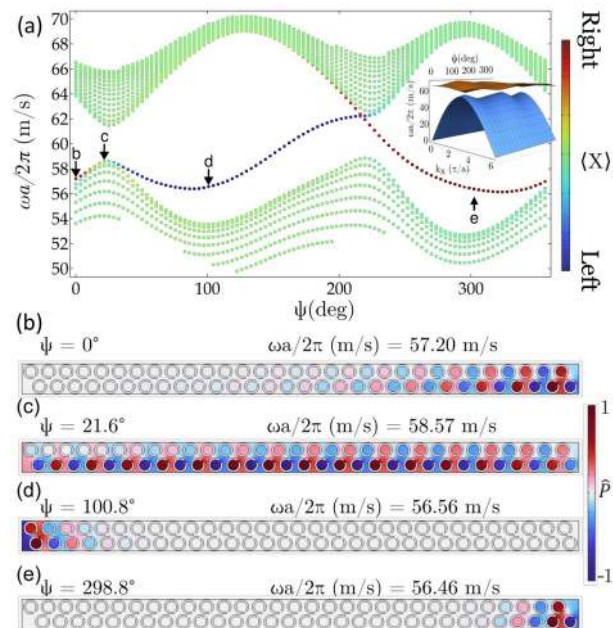


Figure 2. Un paramètre additionnel ψ permet de parcourir un lacet fermé entourant la condition de symétrie glissée en restant toujours dans le groupe Γ_1 (a). Au cours d'un changement adiabatique le mode de bord topologique est échangé entre (b,e) droite et (d) gauche, en passant par (c) un état de volume étendu.

3. Conclusion

En conclusion, nous avons proposé un principe qui permet de produire des cycles topologiques sans faire appel à un modèle analytique. Le cycle adiabatique topologique extrêmement simple pour les résonateurs en forme de C aurait été difficile à deviner à partir d'un modèle analytique, mais nous l'avons découvert sans grand effort en utilisant seulement des arguments géométriques.

4. Bibliographie

- [1] Martínez Iglesias, JA, et al. "Pumping with Symmetry" arXiv preprint arXiv:2306.16401 (2023).
- [2] Martínez Iglesias, JA, et al. "Topological waves guided by a glide-reflection symmetric crystal interface." Physical Review B **106**, 064304 (2022).

Métasurface Modulée Temporellement pour Conversion de Fréquence

T. Lopez^{1,2}, T. Lepetit¹, B. Ratni², S. N. Burokur²

¹ : ONERA, DEMR, Université de Paris-Saclay, F91123 Palaiseau, France,

² : LEME, UPL, Univ Paris Nanterre, F92410 Ville d'Avray, France
 tanguy.lopez@onera.fr / tlopez@parisnanterre.fr

Résumé

La modulation temporelle des métasurfaces apporte une nouvelle dimension particulièrement intéressante pour de nombreuses applications. En effet, la modulation temporelle rend possible la manipulation du spectre spatio-temporel des champs interagissant avec la métasurface. Notamment, dans le domaine de la furtivité radar, l'exploitation de cette propriété permet de nouvelles stratégies de dissimulation dont la cape Doppler, qui repose sur la compensation du décalage Doppler de la cible afin de masquer celle-ci dans le fouillis radar. Ce travail présente donc une métasurface modulée temporellement servant à la conversion en fréquence d'un signal harmonique.

1. Introduction

Les métasurfaces constituent, depuis le début du millénaire, une solution particulièrement intéressante pour la furtivité radar [1]. Grâce à l'intégration de composants électroniques actifs, leurs fonctionnalités se sont rapidement multipliées, permettant entre autres la reconfigurabilité [2]. Depuis quelques années, l'apport de la modulation temporelle de ces éléments électroniques est au cœur de nombreux développements, offrant au passage de nouvelles stratégies de camouflage radar, dont la cape Doppler [3], [4]. Par compensation du décalage Doppler induit par le déplacement de la cible, celle-ci peut alors être confondue avec les éléments statiques de la scène (fouillis radar). Ce travail se concentre donc sur l'étude d'une métasurface modulée temporellement pour la conversion de fréquence de signaux en tant qu'élément d'une cape Doppler complète.

2. Conversion de fréquence par métasurface modulée temporellement

La modulation temporelle d'une métasurface sous illumination doit se faire à une période T_m bien plus large que le temps de relaxation du système afin de garantir l'existence de l'écriture de la relation entre les champs électriques incident, réfléchi et le coefficient de réflexion Γ [4] :

$$E_r(t) = \Gamma(t)E_i(t) \quad (1)$$

Par transformée de Fourier, il est alors possible d'écrire les spectres, dénotés \sim , de ces trois éléments :

$$\tilde{E}_r(\omega) = \tilde{\Gamma}(\omega) * \tilde{E}_i(\omega) \quad (2)$$

Grâce à un coefficient de réflexion à rampe de phase, il est alors possible de convertir la fréquence du signal incident pour générer le signal réfléchi, notamment dans le cas d'une pente négative puisque :

$$x(t)e^{-j\omega_m t} \Leftrightarrow X(\omega + \omega_m) \quad (3)$$

Dans le cas étudié, la métasurface d'intérêt est une version purement capacitive de [2] et forme un circuit LC parallèle avec le conducteur à dissimuler. La phase du coefficient de réflexion de ce circuit est pilotée par la capacité variable montée sur la métasurface. Cette capacité variable est une diode varactor dans les réalisations pratiques [4], mais en dehors d'une certaine perte de puissance à la conversion, son introduction ne compromet pas la conversion de fréquence. Dans le cas simplifié d'une capacité idéale, la phase du coefficient de réflexion de la métasurface obtenue par modulation linéaire de la capacité est présentée sur la Figure 1(a). Par application du schéma de modulation présentée dans l'insert de la Figure 1(a), la phase du coefficient de réflexion est alors transformée en rampe sur la même plage de valeurs de capacité. En associant ces valeurs de capacité à des temps étalés sur une période de modulation, la phase du coefficient de réflexion varie alors linéairement dans le temps.

Pour une onde incidente harmonique, les spectres attendus sont affectés d'un sinus cardinal, à cause de la simulation à durée finie. Sur la Figure 1(b), pour une onde incidente de porteuse $f_0 = 300$ MHz, les

spectres du champ incident (bleu) et réfléchi (rouge) sont comparés après réflexion sur la métasurface modulée à $f_0 \gg f_m = 1$ MHz. Ces résultats sont issus d'une simulation temporelle sur COMSOL® (logiciel de simulation par éléments-finis). On observe une conversion effective du lobe principal du sinus cardinal de f_0 vers $f_0 - f_m$ dans le cas de la modulation vers les basses fréquences amenées par la rampe de pente négative de la Figure 1(a).

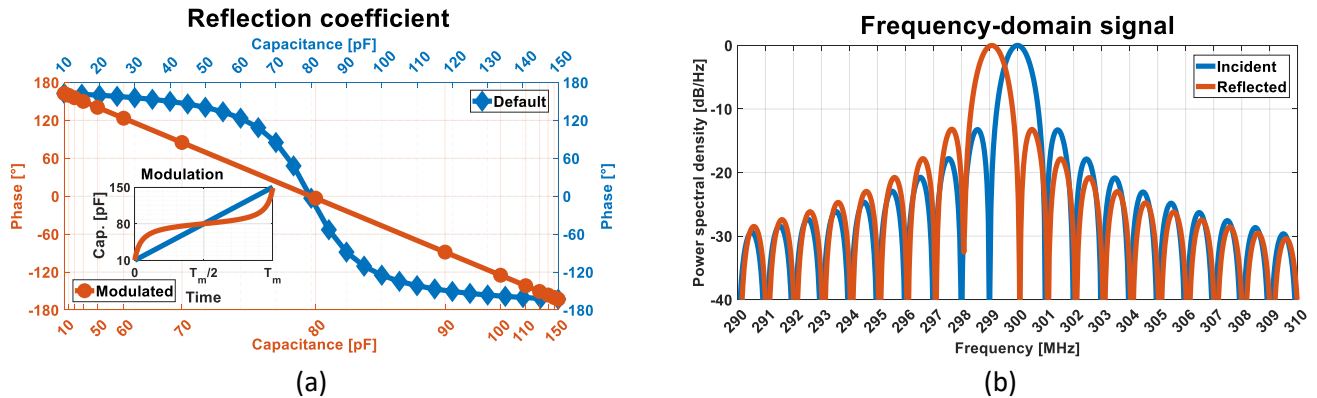


Figure 1. (a) Phase du coefficient de réflexion de la métasurface à $f_0 = 300$ MHz pour une modulation linéaire de la capacité (courbe bleue) et phase linéaire désirée (courbe rouge) offerte par le schéma de modulation spécifique de l'insert. (b) Densités spectrales de puissance du champ harmonique incident (courbe bleue) à $f_0 = 300$ MHz et du champ réfléchi (courbe rouge) converti en fréquence vers $f_0 - f_m$ pour une modulation à $f_m = 1$ MHz.

3. Conclusion

Dans l'optique de multiplier les solutions et stratégies de furtivité radar, ce travail s'intéresse à la viabilité de la modulation temporelle de la métasurface de travail en tant que convertisseur de fréquence. Après établissement des conditions de modulation, puis mise en place du schéma spécifique à rampe de phase, les résultats obtenus par simulation éléments-finis confirment en effet la bonne conversion d'un signal incident d'une fréquence f_0 vers une fréquence $f_0 - f_m$. La validation expérimentale de ce comportement est envisagée, afin de mesurer à la fois le bon décalage en fréquence, ainsi que les pertes de conversion amenées par les diodes varactor, comme évoqué précédemment.

4. Bibliographie

- [1] N. Engheta, «Thin absorbing screens using metamaterial surfaces», *IEEE Antennas Propag. Soc. Int. Symp. (IEEE Cat. No.02CH37313)*, San Antonio, USA, vol. 2, pp. 392-395, 2002.
- [2] T. Lopez, T. Lepetit, B. Ratni et S. N. Burokur, «Experimental validation of a reconfigurable coaxial metasurface radar absorber using varactor diode tuning», *2023 Seventeenth International Congress on Artificial Materials for Novel Wave Phenomena (Metamaterials)*, Chania, Greece, pp. X-211-X-213, 2023.
- [3] V. Kozlov, D. Vovchuk et P. Ginzburg, «Broadband radar invisibility with time-dependent metasurfaces», *Sci. Rep.*, vol. 11, p. 14187, 2021.
- [4] D. Ramaccia, D. L. Sounas, A. Alù, A. Toscano et F. Bilotti, «Phase-induced frequency conversion and Doppler effect with time-modulated metasurfaces», *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 68, no. 3, pp. 1607-1617, 2020.
- [5] X. Wang et C. Caloz, «Spread-spectrum selective camouflaging based on time-modulated metasurface», *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 69, no. 1, pp. 286-295, 2021.

Excitation sélective de modes d'ordres supérieurs dans un réseau résonnant en cavité

Antoine Rouxel¹, Olivier Gauthier-Lafaye¹, Stéphane Calvez¹, Antoine Monmayrant²
¹ : LAAS-CNRS

arouxel@laas.fr

Résumé

Les réseaux résonnants en cavité sont des réflecteurs et des coupleurs efficaces, de petites dimensions et fonctionnant sous faisceaux focalisés. Ils permettent également l'exaltation de processus non-linéaires. Nous mettons en évidence l'adressage sélectif des modes supérieurs de la cavité en contrôlant le profil spatial du faisceau incident.

1. Introduction

Les réseaux résonnants en cavité (ou CRIGF pour *Cavity Resonator Integrated Guided-mode Resonance Filters*) conservent les principaux avantages des GRMF (sélectivité spectrale, transparence, ...) tout en offrant des tailles extrêmement réduites et des profils découplés symétriques et localisés. Les propriétés modales de ces structures ont été étudiées théoriquement et observées expérimentalement en 2013 par R. Laberdesque [1]. Nous présentons ici les résultats expérimentaux concernant l'adressage sélectif de ces modes d'ordres supérieurs grâce à un système optique de mise en forme de faisceau.

2. Description de la structure et des modes d'ordres supérieurs

Le CRIGF est une nouvelle génération de réseaux résonnants introduite en 2012[2]. Il est schématisé sur la figure 1-a) et combine au-dessus d'un guide d'onde, un réseau de couplage (GC) de quelques périodes au centre d'une cavité Fabry-Pérot formée par deux réseaux de Bragg (DBRs). Une zone d'ajustement de phase (PS) assure le recouvrement spectral des résonances du GC et de la cavité Fabry-Pérot.

Excité par un faisceau gaussien focalisé recouvrant tout le GC, le CRIGF offre une réflectivité spectrale monomode fondamentale à fort facteur de qualité.

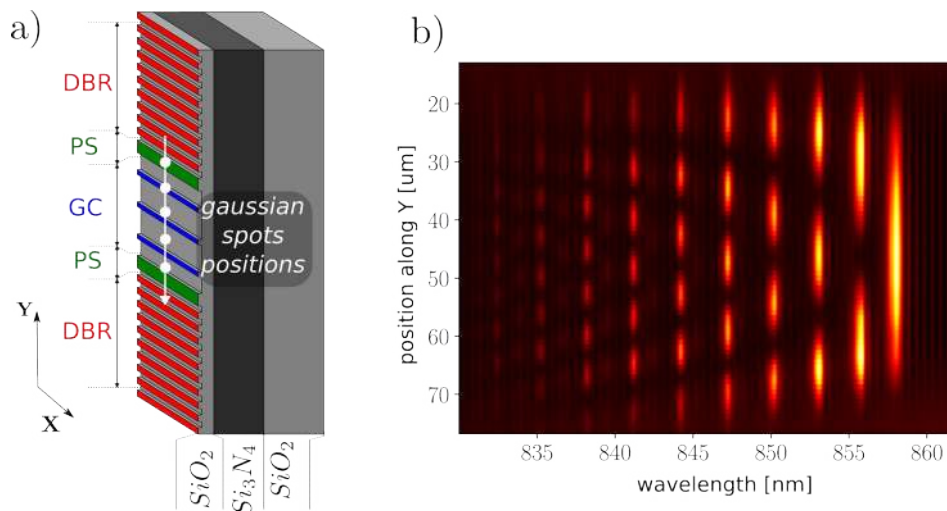


Figure 1 – a) Description du CRIGF. Les points blancs représentent les positions du faisceau gaussien utilisée pour exciter le CRIGF. b) Cartographie des modes d'ordres supérieurs rayonnés. Chaque ligne correspond à une position et chaque colonne correspond à une longueur d'onde .

Les modes d'ordres supérieurs prévus par la modélisation correspondent aux différents modes Fabry-Pérot de la structure. Leur existence peut être mise en évidence par un balayage spatial de la structure dans la direction Y, avec un spot gaussien de dimension très inférieure à celle du GC (de quelques micromètres de diamètre comme indiqué en blanc sur la figure 1-a). Pour chaque position, on effectue également un balayage spectral. La figure 1-b) présente les profils spatiaux des différents modes ainsi obtenus (le mode fondamental monolobe étant autour de 857 nm). On constate dans ce cas, que de multiples résonances spectrales sont excitées avec des intensités dépendant de la position du spot.

3. Excitation sélective des modes de la cavité

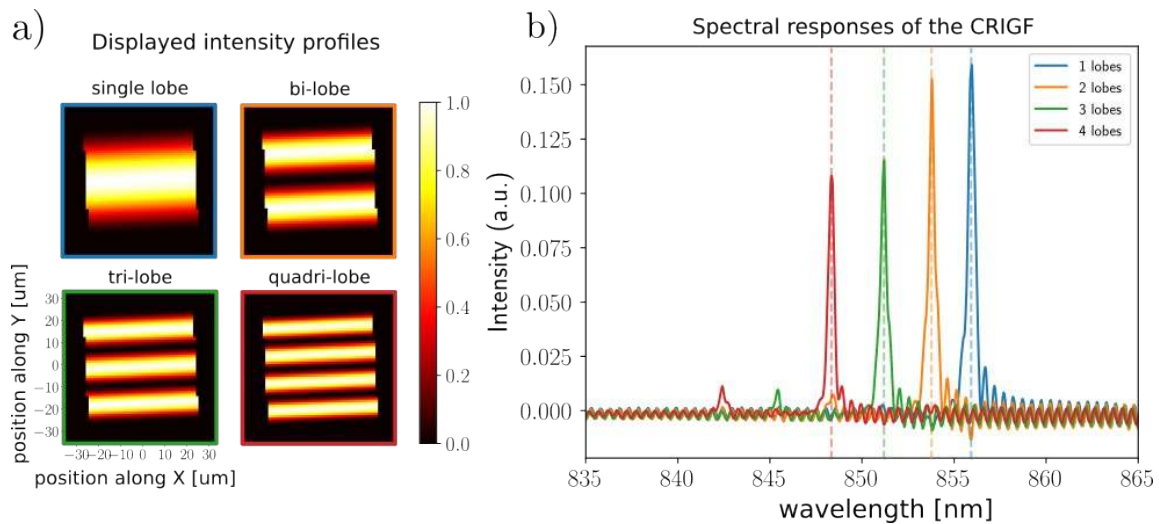


Figure 2 – a) Profils d'intensité générés par le montage optique correspondant aux différents modes de la cavité. b) Spectres mesurés pour chacun des profils.

L'excitation sélective des modes est réalisée grâce un montage optique basé sur un modulateur spatial de lumière. Les profils générés (figure 2-a) , sont ceux correspondants aux modes d'ordres supérieurs de la cavité. Les spectres expérimentaux correspondants aux quatre profils (figure 2-b) valident l'adressage modal sélectif car ils présentent un seul pic d'intensité élevée à la longueur d'onde du mode visé.

4. Conclusion

Ces résultats ouvrent la voie à de nouvelles applications comme la réalisation de coupleurs sélectifs entre des structures photoniques sur puce et des fibres à quelques modes. En optique non-linéaire, ils permettent l'excitation simultanée de plusieurs modes (spectralement) non-dégénérés mais au recouvrement spatial élevé, critère favorable à l'exaltation au sein même de ces composants de processus comme la somme ou la différence de fréquences ou encore la génération paramétrique de photons jumeaux.

5. Bibliographie

- [1] R.Laberdesque et al., High Order modes in Cavity Resonator Integrated Guided-mode resonance Filters (CRIGFs), JOSA.A, Nov 2015
- [2] Kenji Kintaka et al, Cavity-resonator-integrated guided-mode resonance filter for aperture miniaturization. Opt. Express, 20(2) :1444–1449, Jan 2012

Super-resolution imaging from the sound of a resonating bubble

D. Bouchet¹, O. Stephan¹, B. Dollet¹, P. Marmottant¹, E. Bossy¹
¹ Univ. Grenoble Alpes, CNRS, LIPhy, 38100 Grenoble, France
 dorian.bouchet@univ-grenoble-alpes.fr

Summary

We confine a bubble inside a cage using 3D printing technology, and we use this bubble as a local probe to perform scanning near-field acoustic microscopy (SNAM)-an acoustic analogue of scanning near-field optical microscopy (SNOM). By probing the acoustic interaction between a single resonating bubble and its local environment, we demonstrate near-field imaging of complex structures with a resolution that is two orders of magnitudes smaller than the wavelength of the acoustic field.

1. Introduction

Acoustic interactions can be probed using different types of resonators such as a tuning fork, a cantilever, a Chinese gong, or a nanoparticle. However, further advances in scanning near-field acoustic microscopy (SNAM) are hindered by the difficulty of finding local probes that can be easily manipulated, that strongly interact with the acoustic field, and that are sub-wavelength along all dimensions. Gas bubbles are excellent candidates for this application, thanks to their large scattering cross-section and their strongly sub-wavelength dimensions [1]. However, in order to use a single bubble as a local probe for SNAM, one needs to scan the position of the bubble in three dimensions.

2. Principle

We harness the possibility to manipulate a resonating acoustic bubble inside a cage using 3D printing technology [1] and experimentally demonstrate that this bubble can be used as a local probe for SNAM (Figure 1). By measuring variations in the resonance properties of the bubble induced by near-field acoustic interactions, we reconstruct images of structured samples with a resolution that is not limited by diffraction but by the size of the bubble, which is two order of magnitudes smaller than the wavelength of the acoustic field. The method offers different contrast mechanisms, as the various resonance parameters of the bubble (such as its resonance amplitude or its resonance frequency) are influenced by the acoustic impedance of the surrounding environment in a specific way.

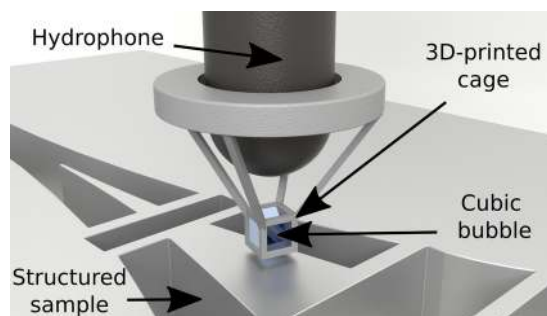


Figure 1. Artistic representation of a cubic bubble confined inside a 3D-printed cage placed at the tip of a hydrophone

3. Bibliography

- [1] B. Dollet, P. Marmottant, and V. Garbin, Bubble Dynamics in Soft and Biological Matter, *Annual Review of Fluid Mechanics* 51, 331-355 (2018).
- [2] M. Harazi, M. Rupin, O. Stephan, E. Bossy, and P. Marmottant, Acoustics of Cubic Bubbles: Six Coupled Oscillators, *Physical Review Letters* 123, 254501 (2019).

Empilements multidiélectriques à absorption contrôlée vers une microscopie de fluorescence à réflexion totale interne exaltée

Y. Toumi¹, A. Mouttou^{1,2}, F. Lemarchand¹, G. Demesy¹, C. Koc¹, D. Muriaux²,
 A. Moreau¹, J. Lumeau¹, C. Favard^{2*} et A. L. Lereu^{1,**}

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

² : Institut de Recherche en Infectiologie de Montpellier, CNRS, Univ of Montpellier France

* cyril.favard@irim.cnrs.fr

** aude.lereu@fresnel.fr

Résumé

Dans cet article, nous présentons les développements de lamelles de microscope amplificatrice du champ optique en conditions d'illumination en réflexion totale interne et donc adaptées à la microscopie de fluorescence à réflexion totale interne (TIRF-M). Nous présentons ici l'optimisation, la réalisation et les caractérisations en TIRF-M de lamelles résonnantes conçues pour prendre en compte les contraintes expérimentales. Ces dernières sont liées à la configuration inversée de la microscopie TIRF ainsi qu'à l'utilisation d'un objectif à grande ouverture numérique. Le défi consiste donc à trouver la meilleure conception d'empilements en faisant un compromis entre la tolérance angulaire et l'amélioration du champ. Nous présentons ici, des premiers tests sur des échantillons fluorescents modèles mais l'objectif ultime est d'arriver à imager et quantifier la dynamique des pathogènes à la membrane cellulaire.

1. Introduction

La microscopie à fluorescence en réflexion totale interne, également appelée microscopie TIRF (Total Internal Reflection Fluorescence), est une technique qui utilise une illumination évanescente pour exciter sélectivement les fluorophores situés au plus proche de la lamelle du microscope sur une épaisseur de la centaine de nanomètre, ce qui lui confère une bonne résolution axiale[1].

La microscopie TIRF présente cependant diverses limitations qui peuvent affecter le contraste optique et la résolution des images biologiques obtenues. Par exemple, le problème d'illumination non uniforme, introduite par la divergence du faisceau incident, peut dégrader la qualité de l'image biologique. En effet, l'intensité du faisceau évanescent à l'interface entre la lamelle et l'échantillon biologique atteint son maximum lorsque l'échantillon est illuminé à l'angle critique. Cependant, le faisceau exciteur est intrinsèquement divergent et par conséquent une partie du faisceau est totalement réfléchi et conduit à la génération du faisceau évanescent, tant que la partie du faisceau arrivant à des angles inférieurs à l'angle critique, se propage à travers l'échantillon et vient bruyier l'imagerie. Pour surmonter ce problème, on peut augmenter l'angle d'incidence pour garantir une illumination uniforme de l'ensemble de l'échantillon, mais cela entraîne une décroissance de l'intensité du champ évanescent qui dégrade à nouveau la qualité de l'image [1].

Les empilements multicouches diélectriques offrent des perspectives prometteuses pour améliorer la sensibilité de l'imagerie TIRF [2] en raison de leur propriété de confinement extrême du champ à l'interface libre [3]. Les empilements multicouches sont composés d'une alternance de matériaux déposés en couches minces et sont utilisées pour modifier le comportement de la lumière. Ainsi, les multicouches diélectriques proposés ici sont conçus et utilisés, pour exalter le faisceau évanescent exciteur sans introduire de modifications optiques supplémentaires sur un microscope TIRF classique [2][4].

Nous avons alors défini des paramètres d'optimisations pour ces empilements dédiés, visant une amplification efficace tout en évitant le photoblanchiment des fluorophores et en tenant compte de la divergence angulaire du faisceau incident.

Après avoir testé en microscopie TIRF, des empilements optimisés en tenant compte de tous ces paramètres, nous avons mis en évidence des désaccords entre la fluorescence attendue et mesurée. Nous avons alors orienté notre optimisation vers un composant à absorption contrôlée c'est-à-dire dont la dernière couche possède un coefficient d'extinction contrôlé et mesurable.

2. Description de la structure proposée

Un paramètre majeur utilisé pour contrôler l'exaltation du champ est le coefficient d'extinction k du matériau utilisé pour la couche supérieure, i.e. en contact avec l'environnement biologique. Comme des valeurs de $k < 10^{-4}$ sont difficilement accessibles expérimentalement et de façon précise, nous avons proposé de remplacer SiO_2 comme couche absorbante par du SiO_i , avec $i < 2$ en contrôlant l'apport en oxygène lors du dépôt et ainsi contrôler le k de cette couche par modification stœchiométrique. Dans ce travail, l'empilement multicouches est alors constitué d'une alternance de couches minces de SiO_2 , matériau de faible indice de réfraction (nL), et de Nb_2O_5 , matériau de fort indice de réfraction (nH) se termine par une couche de SiO_i , avec $i < 2$, pour contrôler l'absorption tout en garantissant la biocompatibilité (Figure 1). L'empilement a été optimisé pour être résonant à une longueur d'onde d'excitation de 561 nm et à un angle d'incidence de 68° .

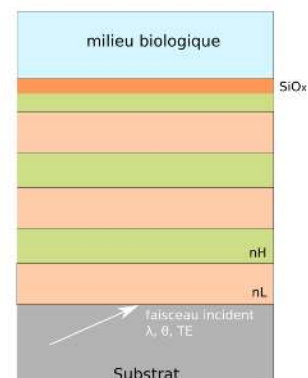


Figure 1. Empilement étudié composé de 7 couches alternant Nb_2O_5 (nL) et de SiO_2 (nL) et se terminant par une couche de SiO_i .

3. Résultats

Une étude numérique a été ensuite réalisée pour évaluer l'effet d'une variation de la valeur de k de la couche SiO_i sur le signal de fluorescence. Le facteur d'amélioration de la fluorescence a été estimé pour différentes valeurs de k pour la couche supérieure, allant de 10^{-5} à 10^{-2} , tout en maintenant la même épaisseur physique. Une augmentation de l'amplification de la fluorescence a été observée en augmentant k , jusqu'à un plateau pour $k > 10^{-4}$. On a alors considéré trois empilements diélectriques pour valider expérimentalement ces prédictions. L'un se termine par une couche de SiO_2 dont $k > 10^{-4}$, et les deux autres se terminent par une couche de SiO_x et SiO_y avec $x < y < 2$. L'exaltation de fluorescence est ainsi calculée en fonction des angles d'incidence pour les trois empilements considérés par rapport à une lamelle en verre classique, comme illustré Figure 2(a). Les maxima sont attendus à des positions angulaires légèrement décalées pour (SiO_y) et (SiO_2) et les facteurs d'exaltation de fluorescence $\times 2,91$, $\times 3,45$ et $\times 4,86$, par rapport au verre, sont prédits pour les empilements (SiO_x), (SiO_y) et (SiO_2) respectivement.

Des mesures de fluorescence ont été ensuite réalisées sur des billes fluorescentes déposées sur la surface libre des empilements. Figure 2 (b) donne l'intensité du signal de fluorescence collecté en fonction de l'angle d'incidence pour les trois structures DM (SiO_x), DM (SiO_y) et DM (SiO_2) et pour un substrat en verre. Une augmentation de la fluorescence d'un facteur $\times 2,5$, $\times 3,5$ et $\times 4,8$, par rapport au substrat en verre, a été obtenue pour (SiO_x), (SiO_y) et (SiO_2) respectivement, voir Figure 2(b). Les figures montrent ainsi le bon accord numérique/expérience en termes d'exaltations de fluorescence ainsi que de décalages angulaires attendus de la résonance pour les 3 structures.

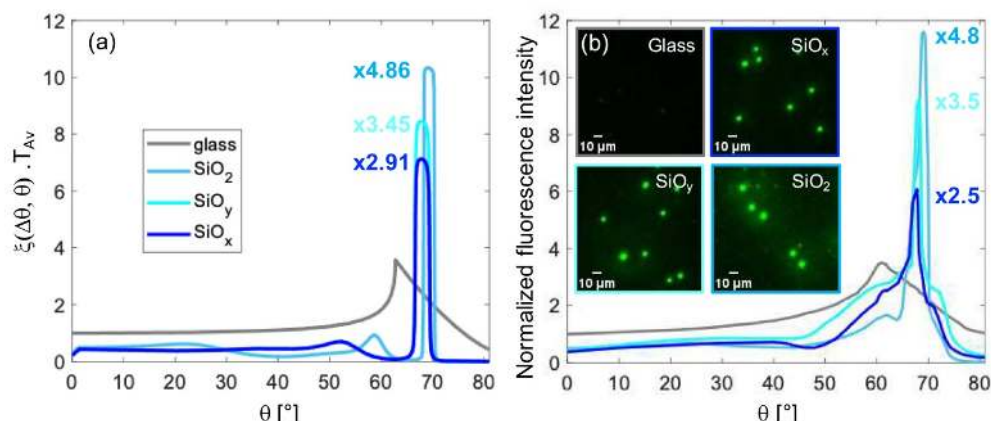


Figure 2. (a) Étude numérique sur la distribution angulaire de l'intensité de fluorescence pour les trois empilements diélectriques (courbes bleues) comparée à celle d'un substrat en verre (courbe grise). (b) Mesures expérimentales de l'intensité de fluorescences sur des billes déposées sur les 3 structures (SiO_x), (SiO_y) et (SiO_2) [2] qui montrent l'accord numérique/expérience.

4. Conclusion

Dans cette contribution, nous avons montré l'intérêt d'utiliser des empilements multicouches diélectriques résonants pour amplifier le champ exciteur évanescent et par conséquent la collection de la fluorescence de la microscopie TIRF. Un facteur d'exaltation de fluorescence supérieur à 4 est observé sur un microscope TIRF à objectif avec une forte divergence angulaire. Avec cette procédure, nous pouvons ainsi prédire l'exaltation de fluorescence attendue selon la configuration TIRF utilisée. Ainsi dans une configuration TIRF avec illumination à prisme donc avec une divergence angulaire bien inférieure à 10 mrad, nous avons observé une exaltation par un facteur 30 sur (SiO_x). Ce travail est en cours.

5. Remerciements

Les auteurs remercient le CNRS pour son soutien financier à travers le programme interdisciplinaire 80|PRIME ainsi que l'Agence nationale de la recherche à travers l'ANR PRC NIS.

6. Bibliographie

- [1] S T. Ross, S Schwartz, T J. Fellers and M W. Davidson. Total Internal Reflection Fluorescence (TIRF) Microscopy. MicroscopyU, <<https://www.microscopyu.com/techniques/fluorescence/total-internal-reflection-fluorescence-tirf-microscopy>>
- [2] A Moultou, F Lemarchand, C Koc, A Moreau, J Lumeau, C Favard, and A L Lereu. Resonant dielectric multilayer with controlled absorption for enhanced total internal reflection fluorescence microscopy. Optics Express, 30(9):15365–15375, 2022.
- [3] A L. Lereu, M Zerrad, A Passian, C Amra. Surface plasmons and Bloch surface waves: Towards optimized ultra-sensitive optical sensors. Applied Physics Letters 111.1, 2017.
- [4] A Moultou, F Lemarchand, C Koc, A Moreau, J Lumeau, C Favard, and AL Lereu. Optimization of resonant dielectric multilayer for enhanced fluorescence imaging. Optical Materials: X, 17:100223, 2023.

Qualitative characterization of Au thin films by scattering Scanning Nearfield Optical Microscopy (s-SNOM)

Valentin Allard¹, Riley Shurvinton¹, Fabien Lemarchand¹, Antonin Moreau¹, Julien Lumeau¹,
Aude L. Lereu¹.

¹Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Méditerranée, Institut Fresnel, Marseille, France.
Courriel 1^{er} auteur : valentin.allard@fresnel.fr

Résumé

Nous présentons une caractérisation de couches minces d'Au en champ proche optique à l'aide d'un s-SNOM (scattering Scanning Nearfield Optical Microscope). L'objectif de cette étude est de corrélérer les résultats obtenus par spectroscopie optique sur des couches minces d'Au de différentes épaisseurs physiques à des mesures locales de structure et de propriétés optiques.

1. Introduction

Cette étude se concentre sur l'imagerie optique en champ proche de films minces d'Au à l'aide d'un s-SNOM. Le s-SNOM est une technique de Microscopie à Sonde Locale (SPM - Scanning Probe Microscopy) utilisant une pointe de microscopie à force atomique, au rayon de courbure nanométrique ($R_C \approx 20$ nm), comme sonde. Ainsi le signal optique n'est plus limité par le critère de Rayleigh, et la résolution spatiale, dépendante de la géométrie de la pointe nanométrique, peut atteindre une valeur de 10 nm/pixel dans une large gamme spectrale (visible à infra-rouge) [1]. Le système *VIS-NeaSCOPE*, développé par *Nanoscale Analytics*, intègre une illumination monochromatique ($\lambda = 632,8$ nm) en réflexion, dans le but de récupérer le signal de champ proche optique généré par le couplage entre la surface de l'échantillon et la sonde selon la direction de rétrodiffusion. Dérivé d'un Microscope à Force Atomique (AFM) utilisé en mode tapping, notre système permet d'accéder à l'amplitude et la phase des oscillations mécaniques de la pointe ainsi qu'à celles du signal de champ proche optique. Cette étude vise à établir un lien entre le changement de permittivité électrique [2] et la variation de signal de champ proche optique dans les couches minces métalliques.

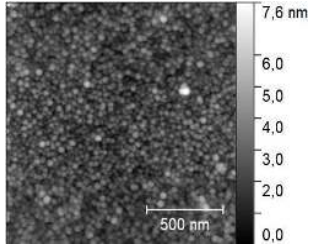
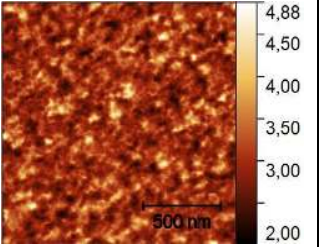
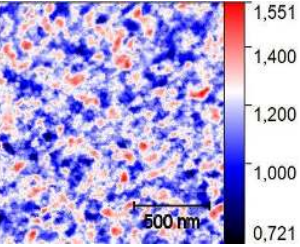
2. Elaboration des échantillons

Les échantillons métalliques ont été élaborées au sein de la plateforme technologique de l'Espace Photonique de l'Institut Fresnel. Les couches minces d'Au ont été déposées sur des substrats de silice en utilisant une machine d'évaporation par canon à électrons *Bühler SYRUSpro 710*. Un contrôle in situ optique et à quartz permettent d'obtenir des dépôts maîtrisés en épaisseur. En utilisant ce procédé, trois échantillons de différentes épaisseurs ont été réalisés : 5,7 nm, 20 nm et 78 nm.

3. Résultats

Les résultats sont présentés sous forme d'images ci-dessous représentant les topographies et les amplitudes et phases du champ proche optique démodulées à la 3^{ème} et 4^{ème} harmonique. Dans notre configuration, illumination visible en réflexion, le signal reçu par le détecteur est majoritairement composé de réflexions, par divers éléments du système, et donc non-issus de l'interaction en champ proche optique. L'interaction de champ proche est un phénomène physique non-linéaire, fonction de la distance échantillon – sonde. Ainsi, la modulation périodique du mouvement de la pointe, par rapport à la surface, entraîne l'apparition d'harmoniques supérieures, auxquelles le signal optique peut être démodulé. Plus l'harmonique de démodulation est importante, plus la composante de champ proche optique devient prépondérante. Dans notre configuration, nous avons confirmé expérimentalement qu'à partir de la 3^{ème} harmonique (3Ω) un signal de champ proche optique pur est obtenu [3].

Tableau 1 : Images de topographie, d'amplitude et de phase du champ proche optique, démodulées à la 3^{ème}, d'une couche mince d'Or d'épaisseur 5,7 nm.

Echantillon \ Image	Topographie	Amplitude (3Ω)	Phase (3Ω)
5,7 nm			

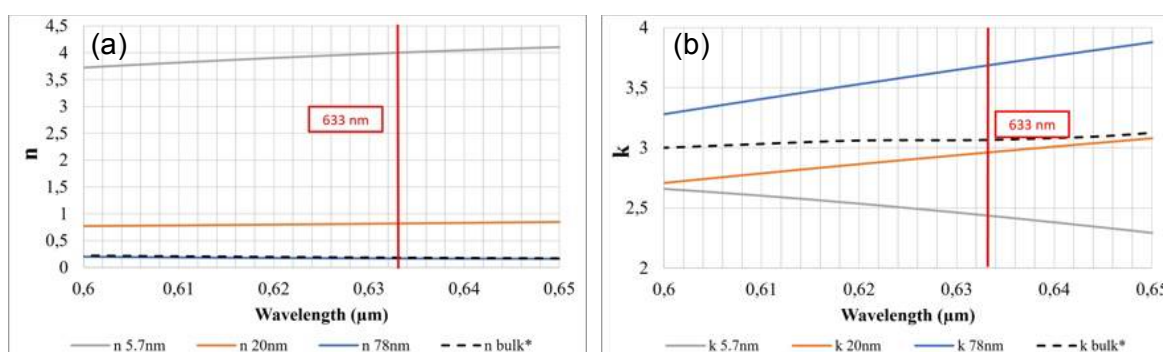


Figure 1 : Variation de l'indice réel n (a) et imaginaire k en fonction de l'épaisseur de la couche mince métallique par spectrophotométrie. [2]

4. Conclusion

L'analyse de couches minces métalliques en champ proche optique a permis de rendre compte des nanostructures des échantillons étudiés. Ces images montrent 3 structures très différentes (nanoparticules, coalescence et film continu), qui réagissent très différemment au couplage visible avec la pointe – sonde. Le *tableau 1* montre les images de topographie, d'amplitude et de phase de champ proche optique pour une couche mince métallique de 5,7 nm d'épaisseur. A mesure que l'épaisseur de métal augmente, la réponse de champ proche devient de plus en plus homogène, conformément à ce qui est décrit par les courbes de dispersions d'indices optiques (*Fig. 1*). Même si l'analyse en champ proche ne nous permet à ce jour, qu'une analyse qualitative, il devrait être possible à terme de relier les changements de signaux de champ proche à l'évolution de permittivité électrique locale [4].

5. Bibliographie

- [1] F. Keilmann et R. Hillenbrand, « Near-field microscopy by elastic light scattering from a tip », *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser. Math. Phys. Eng. Science*.
- [2] R. Shurvinton *et al.*, "Precise spectrophotometric method for semitransparent metallic thin-film index determination using interference enhancement", *Journal of the European Optical Society*.
- [3] T. Taubner, F. Keilmann, et R. Hillenbrand, « Nanoscale-resolved subsurface imaging by scattering-type near-field optical microscopy », 2005.
- [4] A. A. Govyadinov *et al.*, « Quantitative Measurement of Local Infrared Absorption and Dielectric Function with Tip-Enhanced Near-Field Microscopy », *J. Phys. Chem. Lett.*, 2013.

Low-Noise Optical Parametric Amplifier Source for Stimulated Raman Scattering Imaging

I.Martin^{1,2}, S.Bux¹, T.Sylvestre³, S.Métais², H.Rigneault², N.Forget¹,

¹ : Fastlite by Amplitude, 165 route des Cistes, 06600 Antibes, France,

² : Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Marseille, Institut Fresnel, 13013 Marseille, France

³ : Institut FEMTO-ST, Université Bourgogne France comté, Besançon, France
ines.martin@amplitude-laser.com

Resume

We develop a low-noise tunable Optical Parametric Amplifier (OPA) tunable from 0.8 to 1 μm and featuring a relative intensity noise (RIN) which is shot-noise-limited (-160 dB/Hz) at frequencies above 2 MHz. This OPA is driven by a 20-W Kerr-lens mode-locked Ytterbium laser and seeded by a supercontinuum generated in an all-normal-dispersion (ANDi) fiber. Boasting an average output power exceeding 2W, this streamlined and simple setup presents a compelling alternative to synchronously-pumped optical parametric oscillators, in particular for stimulated Raman scattering (SRS) imaging.

1. Introduction

Stimulated Raman Scattering (SRS) [1] microscopy is a dynamic imaging technique that maps chemical bonds in real-time thanks to two picosecond or sub-picosecond synchronized lasers operating at different wavelengths (pump and Stokes wavelengths). Because of the weak SRS coupling, the pump laser is modulated and a lock-in amplifier is used to extract the weak SRS signal from the noise background on the Stokes beam [2]. For this method to be efficient, the RIN of the Stokes beam must be as low as possible and, ideally, at the shot-noise floor at the modulation frequency. This favors light sources operating at high repetition rates (>10 MHz) such as that of mode-locked oscillators. A broad tunability of the pump wavelength is another requirement of this method since multiple chemical bonds are probed in SRS imaging. This work demonstrates that such requirements (low noise, high repetition rate, wavelength tunability) can be met by supercontinuum-seeded optical parametric amplifier (OPA) thanks to the advent of a) low-noise high-power Ytterbium oscillators and b) polarization-maintaining all-normal dispersion (ANDi) photonic crystal fibers.

2. Description of the OPA

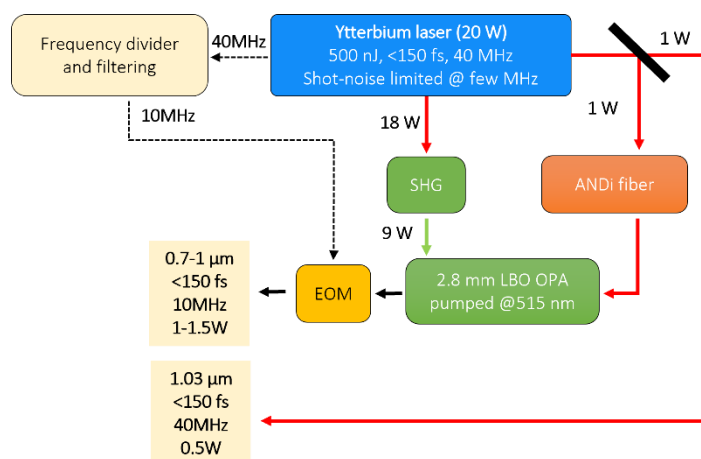


Figure 1. OPA setup

We use a Kerr-lens mode-locked Ytterbium oscillator from Light Conversion (Flint), which produces 20 W of average output power at 1030 nm and delivers pulses of ~ 165 fs FWHM at the repetition rate of 40 MHz. The output power is split as follows: ~ 1 W for the Stokes beam, ~ 1 W to generate a 0.7-1.4 μm supercontinuum in a 10-cm PM-ANDi photonic fiber [3], 18 W for the OPA. The OPA is a single-stage collinear travelling-wave amplifier pumped at 515 nm.

3. Results

The OPA achieves a gain of ~ 200 and delivers up to 2 W of output average power at wavelength tunable from 0.78 μm to 1 μm for the signal beam and from 1.1 μm to 1.3 μm for the idler beam. The optical bandwidth support ~ 75 fs pulses at 0.85 μm . The RIN of the signal beam reaches -160 dB/Hz above a few MHz, which not only matches the RIN of the pump laser but also the shot-noise floor level (for the experimental average photocurrent level). Utilizing this new OPA source, we successfully perform SRS imaging on an olive oil sample using a scanning microscope and a modulation-demodulation technique, demonstrating the effectiveness of this novel approach in SRS microscopy.

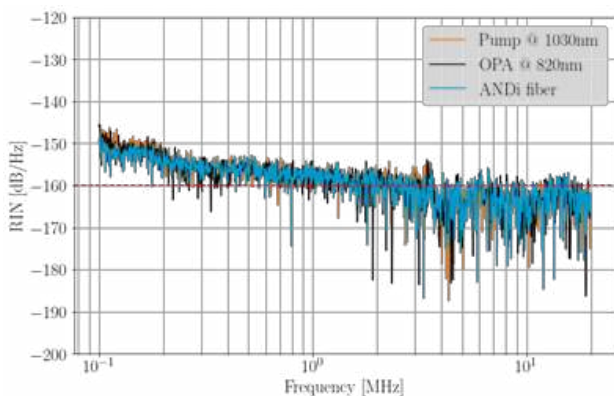


Figure 2. Power spectral density (PSD) of the pump laser (1030 nm), the SC, and the amplified SC (850 nm). The dashed red line indicates the shot-noise floor

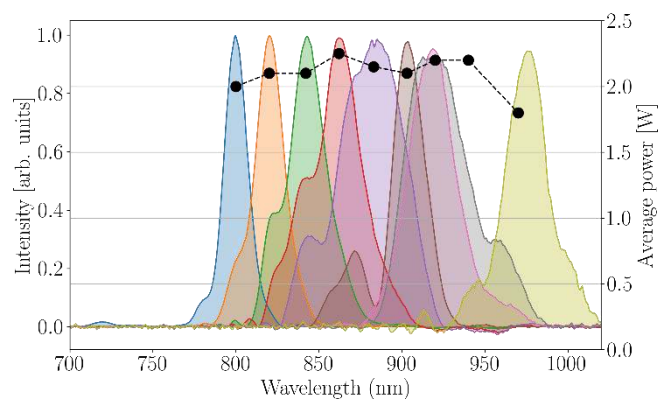


Figure 3. Output spectrum and output average power from the OPA.

4. Conclusion

We demonstrate the development of an efficient single-pass optical parametric amplifier (OPA), powered by a Kerr-lens mode-locked Ytterbium laser. The OPA's relative intensity noise is shot-noise-limited above few MHz, showcasing its low noise level and high performance, comparable to synchronously pumped optical parametric oscillators. This advancement is demonstrated through successful imaging of oil droplets in water using stimulated Raman scattering.

5. Funding

This work is supported by European Union through the European Regional Development Fund (ERDF) forming part of the Programme Opérationnel FEDER-FSE Provence Alpes Côte d'Azur 2014-2020.

6. Bibliography

- [1] Rigneault, H., Berto, P. (2018). Tutorial: Coherent Raman light matter interaction processes. *APL Phot*, 3(9), 091101.
- [2] Audier, X., Heuke, S., Volz, P., Rimke, I., Rigneault, H. (2020). Noise in stimulated Raman scattering measurement: From basics to practice. *APL Phot*, 5(1), 011101.
- [3] Genier, E., Grelet, S., Engelsholm, R. D., Bowen, P., Moselund, P. M., Bang, O., ... Sylvestre, T. (2021). Ultra-flat, low-noise, and linearly polarized fiber supercontinuum source covering 670–1390 nm. *Opt Lett*, 46(8), 1820-1823

Observation of quasi-invariant photocarrier lifetimes in PbS nanocrystal assemblies coupled to resonant and non-resonant arrays of optical

Puyuan HE¹, Augustin Caillas¹, Guillaume Boulliard¹, Ismail Hamdi¹, Pascal Filloux¹, Marco Ravaro¹, Emmanuel Lhuillier², Aloyse Degiron^{1,*}

¹ : Université Paris Cité, CNRS, Laboratoire Matériaux et Phénomènes Quantiques, F-75205 Paris, France

² : Sorbonne Université, CNRS, Institut des NanoSciences de Paris, INSP, F-75005 Paris, France

aloyse.degiron@u-paris.fr, puyuan.he@u-paris.fr

1. Abstract

Compared with being dispersed in a liquid solvent, PbS colloidal quantum dots spin-coated as thin films can have significant differences in the carrier recombination dynamics due to the interactions with the subtract and neighboring quantum dots. In this contribution, we analyze the carrier dynamics of such granular films and their interaction with tailored photonic environment using time-resolved photoluminescence (PL) measurements.

As already noted by other authors [1], the transient PL of such thin films demonstrates a notable wavelength shift to the red as the temporal dynamics unfolds. This behavior is a consequence of non-radiative Förster Resonance Energy Transfer (FRET) from the smallest quantum dots to the largest ones. Our poster examines the influence of non-resonant and resonant arrays of optical antennas on such assemblies of mutually interacting quantum dots. We show that while the geometry and optical properties of the antenna arrays have a direct and sometimes spectacular impact on the transient PL spectra of the emitters, the decay rate at any given wavelength is remarkably similar for all samples. This absence of correlation between PL enhancement and carrier lifetime is not predicted by standard textbook theory and underscores the dual role of FRET in our system. Firstly, FRET proves to be more efficient than other non-radiative energy transfer mechanisms, including Joule dissipation in the metasurface structures, across most wavelengths. Secondly, it facilitates the thermalization of photocarriers among neighboring nanocrystals before their recombination, resulting in behavior akin to an effective semiconducting material that adheres to a generalized form of Kirchhoff's law [2].

We employ a stretched exponential function model for statistical analysis of PL intensity decay [3]. This model effectively describes the FRET effect, capturing key parameters such as the radiative time of donors and acceptors concentration. Our findings shed light on the intricate interplay between spin-coated PbS quantum dots, metasurface structures, and FRET, offering valuable insights for the design and optimization of quantum dot-based optoelectronic devices.

2. References and Notes

- [1] S. W. Clark, J. M. Harbold, and F. W. Wise, "Resonant Energy Transfer in PbS Quantum Dots," *J. Phys. Chem. C*, vol. 111, no. 20, pp. 7302–7305, May 2007, doi: 10.1021/jp0713561.
- [2] A. Caillas, S. Suffit, P. Filloux, E. Lhuillier, and A. Degiron, "Identification of Two Regimes of Carrier Thermalization in PbS Nanocrystal Assemblies," *J. Phys. Chem. Lett.*, vol. 12, no. 21, pp. 5123–5131, Jun. 2021, doi: 10.1021/acs.jpcclett.1c01206.
- [3] J. R. Martins *et al.*, "Statistical Analysis of Photoluminescence Decay Kinetics in Quantum Dot Ensembles: Effects of Inorganic Shell Composition and Environment," *J. Phys. Chem. C*, vol. 126, no. 48, pp. 20480–20490, Dec. 2022, doi: 10.1021/acs.jpcc.2c06134.

Caractérisation exhaustive et contrôle non destructif des structures multicouches sur banc de mesure térahertz multimodal

Y. Abautret¹, C. Amra², M. Zerrad²

¹ : ONERA, Département d'Optique Théorique et Appliquée, 13661 Salon de Provence

² : Aix Marseille Univ., CNRS, Centrale Marseille, Institut Fresnel, Faculté des Sciences - Campus Saint Jérôme, Avenue Escadrille Normandie-Niemen, 13397 Marseille, France

Mail : yannick.abautret@onera.fr

1. Introduction

Depuis plusieurs années, les technologies térahertz sont suffisamment développées pour offrir de nouvelles techniques et idées pour détecter, sonder ou caractériser les matériaux dans divers domaines de recherche^{1,2}. Ces nouveaux instruments basés sur l'exploitation de photomixers permettent d'accéder à l'amplitude et à la phase du signal avec un SNR suffisant sur la gamme de fréquences allant de 100 GHz à 5 THz³. Nous présentons ici un nouveau banc térahertz qui utilise cette technique d'acquisition (TERASCAN 1550) avec une configuration qui permet de réaliser des mesures en réflexion et transmission sur la même zone, pour des angles d'incidence variables (0 à 50 degrés). Cette installation est l'une des premières qui vise à collecter un ensemble complet de données (réflexion, transmission, absorption et phase, stationnarité) dans cette gamme de fréquences térahertz, offrant à la communauté une plateforme munie d'une méthode complète et robuste pour caractériser les matériaux stratifiés. Quelques premiers tests sont présentés avec des mesures effectuées sur un échantillon de plaquette de silicium pour des angles d'incidence de 10 à 40 degrés en mode réflexion et transmission.

2. Dispositif expérimental

Le banc de mesure que nous présentons ici s'appuie sur les techniques d'émission et réception de rayonnement térahertz par des antennes dites photomixers. Les deux modules notés Tx (Transmission) et Rx (Réception) sont conjointement alimentés par un battement optique généré par deux sources laser accordables dont la différence de fréquence correspond à la pulsation térahertz que l'on souhaite observer et étudier. Chacune des antennes est couplée à un miroir parabolique hors axe permettant la collimation du faisceau pour Tx et la focalisation du signal pour Rx (voir Figure 1). La configuration de l'installation prévoit de laisser l'échantillon immobile lors d'un changement de modalité de mesure, qu'il s'agisse du changement d'angle d'incidence (0 à 45°) ou de mode d'acquisition (R ou T). Sachant que le diamètre du spot térahertz focalisé est de l'ordre du mm, ceci permet notamment de réaliser des caractérisations spatialement résolues lorsque les échantillons présentent potentiellement des variabilités spatiales (défauts de revêtement de peinture, structures physiologiques naturellement variables etc...).

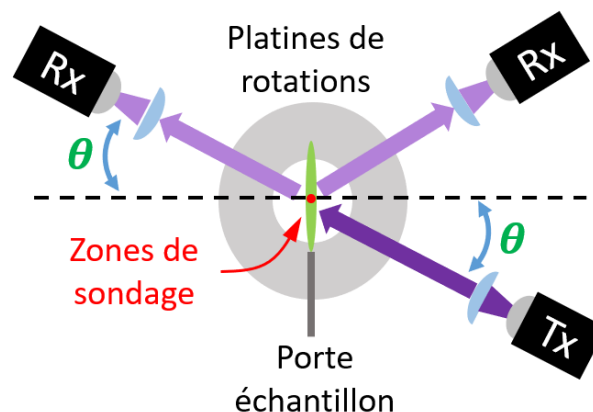


Figure 1 : Configuration géométrique du banc de mesure térahertz. Une première platine de rotation autorise l'ajustement de l'angle d'incidence θ et la deuxième, superposée sur le même axe, permet le mouvement du récepteur Rx et le changement du mode d'acquisition R ou T.

3. Premiers résultats et étalonnage du banc

La Figure 2 présente, après traitement numérique, les résultats obtenus avec la première campagne de mesure réalisée sur un disque Wafer de silicium non absorbant. Sur la gamme de fréquence 100 GHz - 1000 GHz, et pour les angles d'incidence de 10, 20, 30 et 40 degrés, les courbes affichent les coefficients de réflexion R et transmission T, ainsi que leur somme. Les extractions des phases des signaux ne sont pas présentées ici.

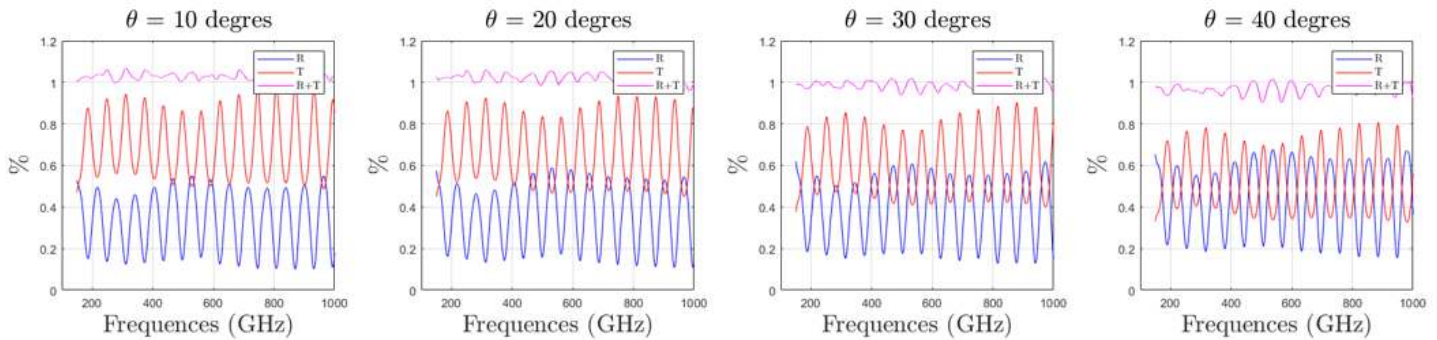


Figure 2 : Mesure sur Wafer de silicium de coefficient de réflexion R, transmission T et leur somme pour des angles d'incidence de 10, 20, 30 et 40 degrés.

Pour chaque incidence, on constate que la réflexion (R) et la transmission (T) sont bien en opposition de phase, et que la somme de ces coefficients est proche de l'unité sur l'ensemble de la gamme fréquentielle. On note toutefois une modulation de quelques % de cette somme autour de l'unité, en partie liée au fait que les extrema de R et T ne passent pas strictement par 0 et 1, comme attendu pour un matériau transparent. Ceci peut être imputable à différents éléments comme une connaissance imparfaite de l'échantillon, ou à des imperfections des configurations géométriques liée aux acquisitions. Ces premiers résultats vont permettre de poursuivre les investigations en ce sens afin d'identifier précisément les facteurs d'erreur significatifs et de les corriger.

4. Conclusion

Ce nouvel outil de mesure consacré à la gamme fréquentielle térahertz ([100-1200] GHz) autorise l'analyse spectrale et angulaire d'échantillons stratifiés. Dans le cas le plus courant où la diffusion peut être négligée, l'enregistrement des faisceaux spéculaires permet, après résolution du problème inverse associé⁴, de recouvrer la structure verticale (indices et épaisseurs) des échantillons. L'utilisation conjointe des données d'amplitude, de phase et d'incidence confèrera plus de robustesse aux algorithmes de reconstruction.

5. Remerciements

Ce travail a été financé et réalisé dans le cadre du projet ANR OptiPAG : ANR-16-CE04-0010. Agence Nationale de la Recherche.

6. Bibliographie

- (1) Abautret, Y.; Coquillat, D.; Zerrad, M.; Buet, X.; Bendoula, R.; Soriano, G.; Brouilly, N.; Héran, D.; Grèzes-Besset, B.; chazalet, frederic; Amra, C. Terahertz Probing of Sunflower Leaf Multilayer Organization. *Opt. Express* **2020**. <https://doi.org/10.1364/OE.400852>.
- (2) Abautret, Y.; Coquillat, D.; Lequime, M.; Zerrad, M.; Amra, C. Analysis of the Multilayer Organization of a Sunflower Leaf during Dehydration with Terahertz Time-Domain Spectroscopy. *Opt. Express* **2022**, *30* (21), 37971. <https://doi.org/10.1364/oe.463228>.
- (3) Jepsen, P. U.; Jacobsen, R. H.; Keiding, S. R. Generation and Detection of Terahertz Pulses from Biased Semiconductor Antennas. *J. Opt. Soc. Am. B* **1996**, *13* (11), 2424. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.13.002424>.
- (4) Amra, C.; Lequime, M.; Zerrad, M. *Electromagnetic Optics of Thin-Film Coatings: Light Scattering, Giant Field Enhancement, and Planar Microcavities*; Cambridge University Press, 2020.

Theory and design of Passive Daytime Radiative Coolers

N. Namazzade¹, and A. Baron^{1,2}

¹ : Univ. Bordeaux, CNRS, CRPP, UMR 5031, F-33600 Pessac, France,

² : Institut Universitaire de France, 1 rue Descartes 75231 Paris Cedex 05, France
nigar.namazzade@cnrs.crpp.fr

Abstract

The initial design steps towards the fabrication of metamaterial fabrics for passive daytime radiative cooling are presented. The structure considered consists in a regular network of silica microfibers.

1. Introduction

Passive daytime radiative cooling (PDRC) is a phenomenon by which a body exposed to solar radiation can cool by thermal radiation passively [1]. For this to happen, the body should backscatter all of the solar radiation with a high efficiency and exhibit a strong thermal emissivity in the atmospheric transparency window (ATW) in the [7-14 μm] range [2]. According to Kirchhoff's law of thermal radiation, the emissivity of a body at thermal equilibrium is equal to its absorptivity, such that designing a perfect absorber in a spectral window corresponding to its blackbody radiation is the same as designing a perfect emitter in that range. Following this principle, we aim at designing and building a metamaterial that operates as a passive daytime radiative cooler. The metamaterial should exhibit maximal reflectance in the [0.5-2.5 μm] interval and maximal absorption in the ATW. Our ultimate goal is to come up with a design concept that is versatile enough to conform to any surface, in order to decrease the temperature of a desired object by covering it with the metamaterial that would come in the form of a fabric of sorts. This would happen typically when the total emitted power outweighs the total absorbed power, and as a result, the temperature of the desired object would decrease. Here we focus on a potential structure made of a woven network built from SiO₂ fibres. SiO₂ appears as a material of choice, because it exhibits very good emittance in the ATW [3]. We present here the initial guiding principles that shall enable us to target an optimized metamaterial fabric. The optical properties of such a network are studied through Mie scattering theory for individual microfibers and through the finite-element method based solver COMSOL Multiphysics for the fibre network.

2. Design approach and conditions for maximal absorption

Consider an individual infinitely long cylinder that constitutes the unit fibre of the network. One possible design route to achieve perfect absorption is to first reason at the level of an individual fibre before considering the network, under plane wave illumination normal to the cylinder axis (see Fig. 1(a)). To achieve maximal absorption, two conditions should be achieved at the scale of one particle [4]

1. The generalised Kerker condition [5]: it ensures a zero of scattering in the backward direction and occurs when the superposition of even multipolar radiation is equal in amplitude and phase to the superposition of odd multipolar radiation. This condition can be achieved by minimizing the T_1 and T_2 coefficients of the T-matrix relating the scattered field to the incident field (see Bohren & Huffman [6]). Figure 1(b) is a colour plot of $\log_{10}(|T_2|)$ as a function of wavelength (λ) and fibre radius (a). A similar plot can be obtained for $\log_{10}(|T_1|)$.
2. The critical coupling condition [4]: it ensures that the absorption is maximal and occurs when the

scattering efficiency Q_s is equal to the absorption efficiency Q_a . Figure 1(c) is a colour plot of $\log_{10}(|Q_s - Q_a|)$ as a function of wavelength and fibre radius in the case of TM illumination. This figure can also be obtained for TE illumination.

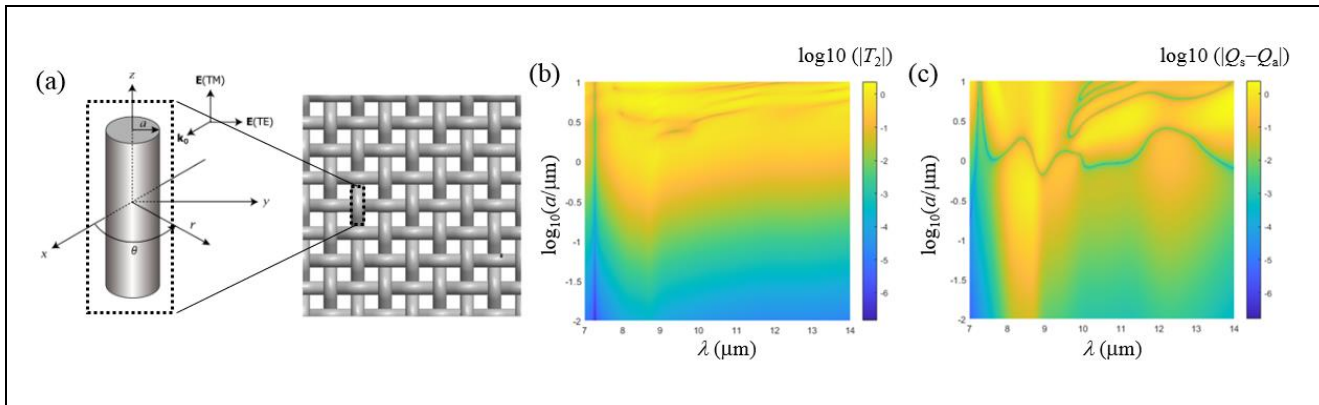


Figure 1. Fibre network considered and figures-of-merit computed for absorption optimization.
 (a) Woven fibre network considered (illustration on the right-hand side) composed of infinite circular fibres. The inset on the left-hand side is an illustration of an infinitely long circular cylinder with the illumination configurations represented on the top right. (b) Colour plot of $\log_{10}(|T_2|)$, where T_2 is the T-matrix coefficient relating the TE component of the scattered field to the TE component of the incident field. The plot is obtained as a function of the fibre radius a and wavelength λ of the incident radiation. (c) Similar colour plot as in (b) of $\log_{10}(|Q_s - Q_a|)$, where Q_s (resp. Q_a) is the scattering (resp. absorption) cross-section efficiency.

4. Conclusion

Considering an infinite long cylinder, several areas of the (a, λ) plane satisfy the two conditions simultaneously that enable an optimization of the absorption of a single silica fibre. Such parameters will be used as initial targets to explore parameter space for the fibre network. The poster shall present the theory used in the design, as well as the absorption of fibre networks considered based on the analysis of the individual particle.

6. Bibliography

- [1] Howell, J. R., Mengüç, M. P., Daun, K., & Siegel, R. (2020). *Thermal radiation heat transfer*. CRC press.
- [2] Chen, M., Pang, D., Chen, X., Yan, H., & Yang, Y. (2022). Passive daytime radiative cooling: Fundamentals, material designs, and applications. *EcoMat*, 4(1), e12153.
- [3] S. Popova, T. Tolstykh, V. Vorobev. Optical characteristics of amorphous quartz in the 1400–200 cm⁻¹ region, *Opt. Spectrosc.* 33, 444–445 (1972).
- [4] Dezert, R., Richetti, P., & Baron, A. (2019). Complete multipolar description of reflection and transmission across a metasurface for perfect absorption of light. *Optics express*, 27(19), 26317-26330.
- [5] Kruk, S., Hopkins, B., Kravchenko, I. I., Miroshnichenko, A., Neshev, D. N., & Kivshar, Y. S. (2016). Invited Article: Broadband highly efficient dielectric metadevices for polarization control. *Appl Photonics*, 1(3).

[6] Bohren, C.F. and D.R. Huffman, 1983. Absorption and Scattering of Light by Small Particles, John Wiley & Sons.

**Nonlinear spin-orbit coupling in optical thin
films**

Domenico de Ceglia^{1,2*}, Laure Coudrat^{3*}, Iannis Roland³, Maria Antonietta Vincenti^{1,2}, Michael Scalora⁴, Rana Tanos⁵, Julien Claudon⁵, Jean-Michel Gérard⁵, Aloyse Degiron³, Giuseppe Leo^{3,6} and Costantino De Angelis^{1,2}

¹CNIT and DIE, University of Brescia, Via Branze, 38, Brescia, 25123, Italy.

²INO, CNR, Via Branze, 45, Brescia, 25123, Italy.

³Laboratoire MPQ, Université Paris Cité & CNRS, 10 rue Domon et Duquet, Paris, 75013, France.

⁴Charles M. Bowden Research Center, Redstone Arsenal, 35898-5000, USA.

⁵Univ. Grenoble Alpes, CEA-IRIG-PHELIQS, Grenoble, F-38000, France.

⁶Institut universitaire de France (IUF).

Laure.coudrat@u-paris.fr

Résumé

We demonstrate that a nonlinear spin-orbit interaction is possible in thin films of materials possessing a second-order nonlinear susceptibility tensor that mixes the longitudinal component with the transverse component of the pump field. We observe our predictions in the second-harmonic generation from a thin film of aluminum gallium arsenide, a material system that is a well-established playground for the development of active, nonlinear and quantum photonic devices. The film emits vortex beams of second-harmonic light when pumped with a circularly-polarized Gaussian beam.

Posters GT3

**Full waveform inversion for ultrasound tomography.
Imaging musculoskeletal tissue in children.**

E. Doveri¹, K.J.H. Konan¹, V. Monteiller¹, R. Guillermin¹, L. Espinosa², C. Baron³ and P. Lasaygues¹
¹ : Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Méditerranée, LMA, Marseille, France,
² : Univ. Toulouse 3 - Paul Sabatier, Institut Clément Ader, Tarbes, France
³ : Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Méditerranée, IRPHE, Marseille, France
 Email lasaygues@lma.cnrs-mrs.fr

1. Background, motivations and objectives

B-mode ultrasound (US) has long been the primary modality for diagnosing musculoskeletal tissue in children. Because of the large impedance contrast between hard and soft tissues, US can only see the outer surface of bones, not what lies within. In this context, linear ultrasound computed tomography (USCT) has been able to visualize musculoskeletal morphologies with appropriate signal processing [1], but has not been able to provide quantitative maps. To overcome these limitations, a nonlinear full waveform inversion (FWI) algorithm [2] is implemented to provide quantitative maps, and evaluated on anatomical phantoms.

2. Statement of contribution and methods

The FWI is a parametric imaging method that is based on the full numerical modeling of wave propagation, and on the iterative minimization of a cost function to determine the physical parameters (in this work : geometry and impedance). The mean-square solution was calculated using the quasi-Newton technique, which uses information based on second-order derivatives in order to accelerate convergence, and the gradient of the cost function was calculated using the adjoining field method. The important difficulty related to the strong non-linearity of the cost function is that gradient-based minimization algorithms only converge to the solution if they are started close to the global minimum of possible values. In this work, we exploited the geometry provided by the linear USCT as a priori information for the FWI. Experiments were conducted, using a 1-MHz circular array on a newborn arm phantom containing blood vessels and joined bones (Figure 1), some of whose physical properties are listed in Table 1.

Medium	Ultrasonic velocity (c) (m/s)	Mass density (kg/cm ³)	Impedance (MRays)	Attenuation (dB/cm)	$\left(\frac{c_{\text{tissue}}}{c_{\text{water}}}\right) - 1$
Water (17°C)	1467	1000	1.47	0.011	-
Soft body	1423 ± 10	1000	≈ 1.423	1.1 ± 0.2	-0.03
Blood vessel	1400 ± 10	1020	≈ 1.428	1.7 ± 0.2	-0.04
Blood	1400 ± 10	999	≈ 1.399	1 ± 0.2	-0.04
Bone	1129 ± 5	2160	≈ 2.439	21 ± 2.0	-0.23

Table 1: Mean properties of materials constituting the newborn arm phantom (True Phantom Solutions Inc., Windsor, Canada) measured at 1 MHz.

3. Results and discussion

By comparing USCT (Figure 1, center) and μ CT (Figure 1, left) as a reference, organ morphometry was made possible. The blood vessels in the arm phantom were differentiated, and so were the different bones. The linear USCT shows artifacts due to various uncontrolled physical processes, although the dimensions of the soft tissue and bone contours are satisfactory to differentiate the regions of interest. This a priori information was used to reconstruct the acoustic impedance of the several tissues of the phantom using FWI (Figure 1, right). The resolution gain for the bones reaches 1784%, but the resolution of soft tissues contours (especially blood vessels) is degraded. This is probably due to unrealistic and therefore biased velocity contrast values (Table 1). In fact, the contrasts between the materials, particularly for the bone parts, and the reference water are negative and less than 1, whereas for real tissues they would be greater than 1 and of the order of 1.5 for bone (wave

velocity around 3500 m/s). The solutions of the FWI algorithm are trapped in local minima, even though a frequency-hopping method [3] was used, and strict stopping criteria defined [4].

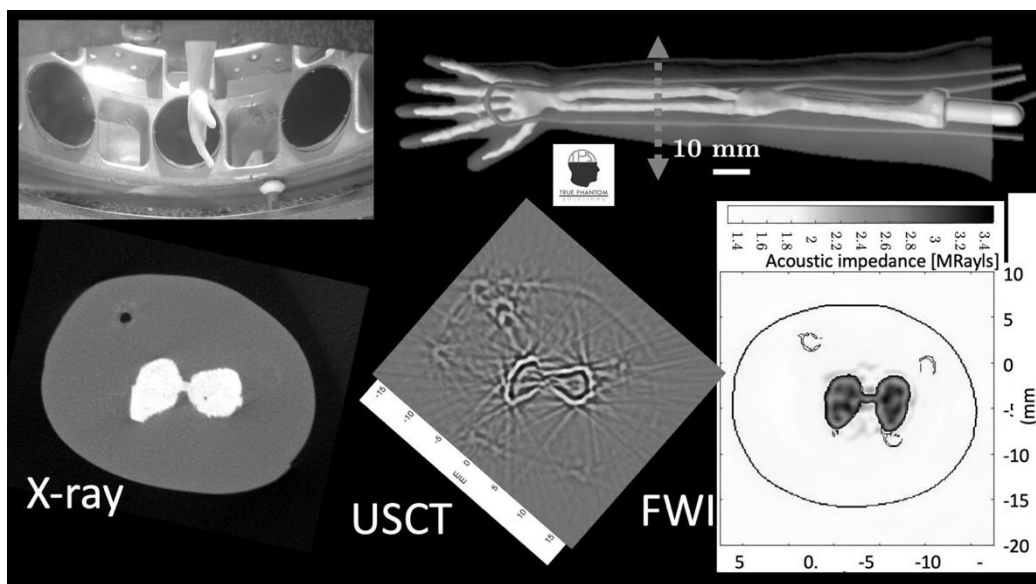


Figure 1. Full waveform imaging adapted for the ultrasound tomography. Imaging a newborn arm phantom (True Phantom Solutions Inc., Windsor, Canada)

5. Acknowledgments/fundings

Centre de Calcul Intensif d'Aix-Marseille (Mesocentre) is acknowledged for granting access to its high-performance computing resources. The project has received funding from the Excellence Initiative of Aix-Marseille University - A*Midex, a French "Investissements d'Avenir programme" - Institut Mécanique et Ingénierie (IMI, AMX-19-IET-010). Elise Doveri's PhD thesis was funded by the French Ministry of Research and K.J. Hermann Konan's internship was funded by the Institut Marseille Imaging.

6. References

- [1] E. Doveri, L. Sabatier, V. Long, and P. Lasaygues, "Reflection-Mode Ultrasound Computed Tomography Based on Wavelet Processing for High-Contrast Anatomical and Morphometric Imaging," *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 20, p. 9368, Oct. 2021, doi: 10.3390/app11209368.
- [2] S. Bernard, V. Monteiller, D. Komatitsch, and P. Lasaygues, "Ultrasonic computed tomography based on full-waveform inversion for bone quantitative imaging," *Phys. Med. Biol.*, vol. 62, no. 17, pp. 7011–7035, Aug. 2017, doi: 10.1088/1361-6560/aa7e5a.
- [3] R. Guillermin, P. Lasaygues, G. Rabau, and J.-P. Lefebvre, "Quantitative non-linear ultrasonic imaging of targets with significant acoustic impedance contrast—An experimental study," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 134, no. 2, pp. 1001–1010, Aug. 2013, doi: 10.1121/1.4812778.
- [4] L. Espinosa, E. Doveri, S. Bernard, V. Monteiller, R. Guillermin, and P. Lasaygues, "Ultrasonic Imaging of high-contrasted objects based on full-waveform inversion: limits under fluid modeling," *Ultrason. Imaging*, vol. 43, no. 2, pp. 88–99, Mar. 2021, doi: 10.1177/0161734621990011.

Towards CARS Fourier ptychography microscopy

E.M. Fantuzzi¹, A. Sentenac¹, S. Heuke¹, H. Rigneault¹

¹Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Marseille, Institut Fresnel, Marseille, France
 eric.fantuzzi@fresnel.fr

Abstract

The urgency of developing a fast cancer diagnosis tool cannot be overstated. Early detection plays a critical role in improving patient outcomes and increasing the chances of successful treatment. Cancer diagnosis often relies on invasive procedures and time-consuming histopathological analysis, which can lead to delays in initiating treatment and potentially worsen patient prognosis. In this context, we present the application of Fourier ptychography microscopy (FPM) to the field of wide-field coherent anti-Stokes Raman scattering (CARS) microscopy. FPM is a computational technique that enables coherent imaging by numerically reconstructing the sample from images acquired under various illumination directions. By collecting a series of partially overlapping images using different illumination angles, the FPM algorithm processes the data to reconstruct a high-resolution image of the sample. When applied to CARS microscopy, Fourier ptychography gives rise to CARS-FPM. This innovative approach utilizes an illumination scheme composed of a galvo mirror and a 4f-system, which guarantees both wide-field illumination and precise control over the sampling angle. A phase camera acquires the images, and the quadri-wave lateral shearing interferometry (QLSI) technique is applied to retrieve both the amplitude and phase of the image for each illumination angle. With this information, it is possible to numerically reconstruct the distribution of the Raman scatterer density of the sample, providing an improved resolution and yielding both the real and imaginary parts of the third-order susceptibility, which give access to the non-resonant background free Raman information.

1. Introduction

Quantitative phase microscopy (QPM) encompasses various optical techniques used to map the phase of light as it passes through a microscope's object plane [1-2]. Quadriwave lateral shearing interferometry (QLSI) is an optical method that captures wavefront images using a two-dimensional grating in front of a camera [3]. When applied to microscopes, QLSI can function as a QPM technique due to the correlation between phase and wavefront [4]. In this scenario, we are looking to merge QLSI with Fourier ptychography (FP) [5]. QLSI enables the reconstruction of an image's amplitude and phase, while FP computationally enhances its resolution. Applying these two techniques to Second Harmonic Generation (SHG) is the first natural step before developing a non-resonant background-free wide-field CARS (Coherent Anti-Stokes Raman Scattering) microscopy technique through the image phase reconstruction [6-7].

2. Implementation of SHG-FPM

In the case of a standard wide-field microscope, the sample is illuminated perpendicularly to the sample plane (Fig. 1a). This allows only a partial exploration of the sample's Fourier space (Fig. 1b, orange circle). However, in Fourier Ptychography (FP), the sample is illuminated using additional angles of incidence, and an image is collected for each different angle used (Fig. 1a). These images are then digitally processed to create a final composite image. This enables a broader exploration of the sample's Fourier space, resulting in an enhanced resolution compared to using a single illumination angle. Moreover, in this project, we aim to combine wide-field Second Harmonic Generation (SHG) Fourier Ptychography with Quantitative Phase Imaging (QLSI). This technique allows the reconstruction of the phase of the collected light by employing a cross-grating and a standard CMOS camera. As shown in Fig. 1c, the grating is not directly imaged onto the camera plane but is positioned slightly before it. This configuration enables the creation of four replicas of the

image, which interfere with each other. Using an algorithm, these four replicas are utilized to reconstruct both the amplitude and the phase of the sample.

In our case, we acquire both the phase and amplitude information of the image for each illumination angle and subsequently apply the principles of Fourier Ptychography. This constitutes the initial step towards developing a wide-field Coherent Anti-Stokes Raman Scattering (CARS) setup. In CARS imaging, the reconstruction of the sample's phase is crucial for distinguishing between the resonant component (associated with the sample's vibrational contributions) and the non-resonant component (related to electronic contributions).

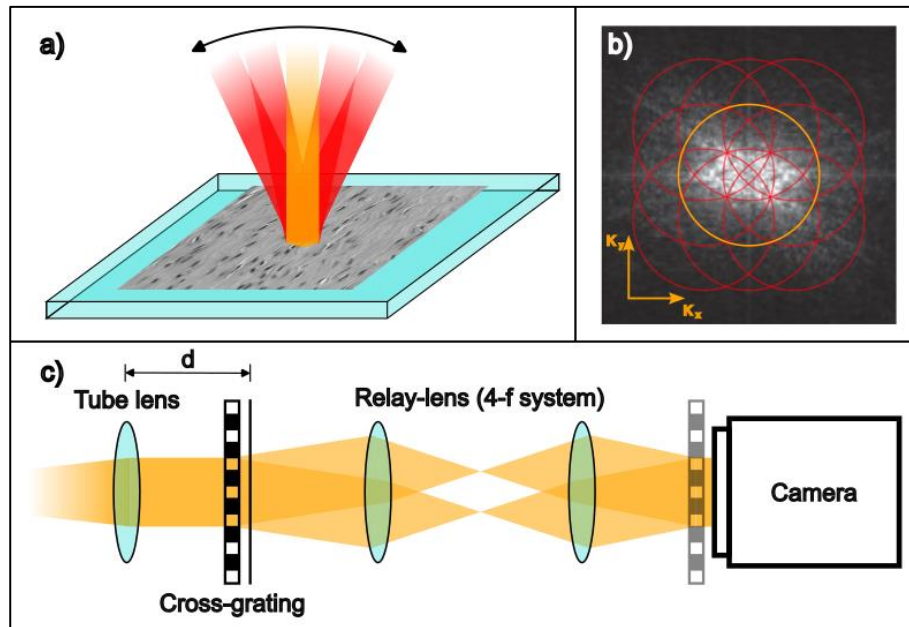


Figure 1. a) Schematic representation of the sample illumination angles used in Fourier Ptychography. b) Orange: Fourier space explored with normal illumination to the sample plane; Red: Extension of the sample's Fourier space explored due to various illumination angles. c) Position of the cross-grating concerning the sample/camera plane to achieve the four replicas of the sample's image.

3. Conclusions

We introduced and proposed a novel wide-field non-linear optical technique SHG-FPM coupled with a computational algorithm that allows improving the resolution of wide field nonlinear imaging. Moreover, by using QLSI is possible to retrieve both amplitude and phase of the image. This results to be the first experimental step to then move towards wide-field super-resolved CARS phase retrieval.

4. References

- [1] Popescu, G. Quantitative phase imaging of cells and tissues; McGrawHill, 2011.
- [2] Nguyen, T. L.; Pradeep, S.; Judson-Torres, R. L.; Reed, J.; Teitell, M. A.; Zangle, T. A. Quantitative Phase Imaging: Recent Advances and Expanding Potential in Biomedicine. *ACS Nano* 2022, 16, 11516–11544.
- [3] Primot, J. Three-wave lateral shearing interferometer. *Appl. Opt.* 1993, 32, 6242.
- [4] Baffou, Guillaume. "Wavefront microscopy using quadriwave lateral shearing interferometry: from bioimaging to nanophotonics." *ACS photonics* 10.2 (2023): 322-339.
- [5] G. Zheng, R. Horstmeyer, and C. Yang, "Wide-field, high-resolution fourier ptychographic microscopy," *Nat. Photonics* 7, 739–745 (2013).
- [6] Heuke, Sandro, et al. "Coherent anti-stokes raman fourier ptychography." *Optics Express* 27.16 (2019): 23497-23514.
- [7] Heuke, Sandro, Hervé Rigneault, and Anne Sentenac. "3D-coherent anti-Stokes Raman scattering Fourier ptychography tomography (CARS-FPT)." *Optics Express* 29.3 (2021): 4230-4239.

Impulsive stimulated Raman scattering imaging using an ultra-fast acoustic-optics delay line.

S. Suresh¹, S. Metais¹, I. Martin^{1,2}, S. Shivkumar¹, B. Mahler³, N. Forget⁴, H. Rigneault¹

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

2- Fastlite, 06600 Antibes, France

3- Institut Lumière-Matière, CNRS UMR5306, Université Lyon 1, Université de Lyon, 69622 Villeurbanne, France

4- INPHYNY, Univ Côte d'Azur, CNRS, Nice, France

sisira.suresh@fresnel.fr

Abstract

We introduce Impulsive stimulated Raman scattering (ISRS), a time domain approach where a pump pulse impulsively excites a molecule, activating all the modes within its bandwidth resulting in a transient refractive index modulation [1]. This can be probed using a second pulse through changes in its spatial profile, spectrum and/or polarization [2-4].

In this study, we elucidate the implementation of transient refractive index detection for the acquisition of ultrafast hyperspectral images. We show some preliminary results of imaging Cadmium Selenide (CdSe) nanoplatelets functionalized with thiol ligands. Additionally, we present a separate project detailing the integration of a random-access delay line into the existing setup to enable time scanning windows of up to 50 ps at random time delays.

1. Introduction

The vibrational motion of a molecule is intrinsically linked to its structure and composition, which provides a way to identify it. Raman spectroscopy, utilizing the inelastic scattering of light, investigates these molecular vibrations. While Raman shifts exceeding 200 cm^{-1} primarily capture intramolecular vibrations, lower Raman shifts ($< 200\text{ cm}^{-1}$) provide insights into the collective motion of molecules, thereby revealing valuable structural information. Since its first demonstration, Raman scattering technique has evolved rapidly to its widely used version of Coherent Raman spectroscopy (CRS). In spite of its various advantages in terms of speed and sensitivity, CRS also has its limitations, such as the need for more complex and expensive instrumentation and the inability to probe low-frequency vibrational modes. This difficulty was overcome by the technique of Impulsive stimulated Raman Scattering (ISRS) that uses a pump-probe approach to investigate the molecules in time-domain.

2. Implementation of ISRS with an Ultrafast Acousto-optic delay line: the Dazzler

We detect the change in spectra of the probe beam, after the pump has impulsively excited the sample to give a transient refractive index that lasts for a few ps. To probe this variation that lasts for such a short time, we use an acousto-optics programmable dispersive filter (AOPDF) (Dazzler, Fastlite). Figure 1(a) shows its working principle. It is simply a birefringent crystal that has an acoustic wave passing through it. When the optical pulse interacts with the acoustic wave, it rotates into the slow axis and gets delayed. The pulses interact with the acoustic wave at different points, resulting in a delay line. The AOPDF can scan a delay of 4.5ps in 25 μ s only making it the fastest ever optical delay line. The probe pulse thus sees a varying refractive index as it travels across the sample, changing its spectral profile. This can then be seen as an intensity modulation using a long/short pass filter centred at probe frequency. Fourier Transform of this

information gives us the Raman Spectrum [5]. Figure 1(b) illustrates this idea.

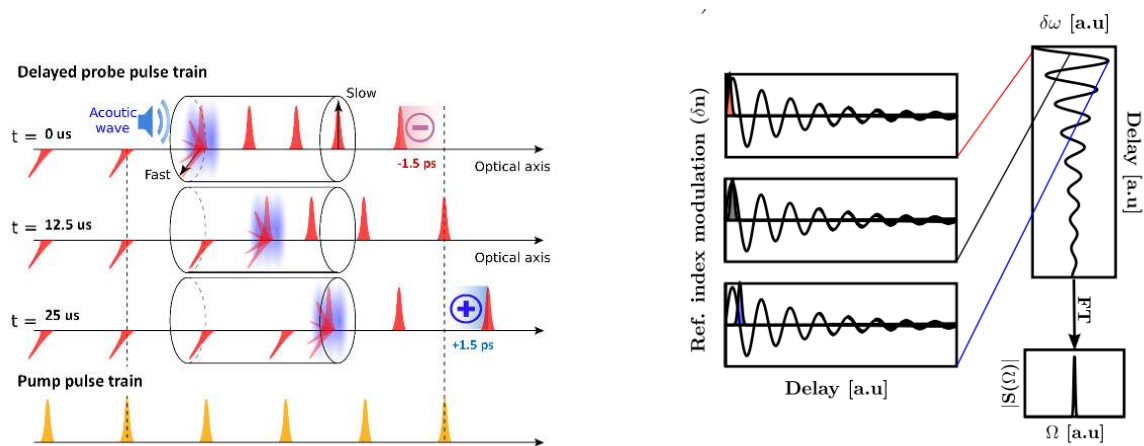


Figure 1. a) Working principle of the AODF b) The effect of spectral shift on the probe beam

3. Implementation of ISRS with a random-access delay line

Although the AOPDF works perfectly as an ultrafast delay line, it is limited by its small scanning window (4.5 ps), and the fact that it scans continuously across its delay range. We introduce here the development and implementation of a novel delay line based on an acousto optic deflector (AOD) that is placed inside a 4f system. This new delay line can scan 50 ps time window both continuously or with any delay combination, that we call “random access time delay”. This enables us to selectively detect samples whose temporal vibrations are known beforehand. By selecting the delays that we scan, we can differentiate samples with the lifetime of their oscillations, and their frequency.

4. Conclusions

We introduced the concept of impulsive stimulated Raman imaging, and how we implement it using 2 types of delay lines. The first one being an AOPDF that can scan 4.5ps in 25μs only and shape the pulses and the second one, based on an Acousto-optic, that can scan longer delays, both continuously and in a random-access fashion, which we can use for selective detection and compressed sensing.

5. References

- [1] R. A. Bartels, D. Oron, and H. Rigneault, "Low frequency coherent Raman spectroscopy," *Journal of Physics: Photonics* **3**, 042004 (2021).
- [2] D. Raanan, J. Lüttig, Y. Silberberg, and D. Oron, "Vibrational spectroscopy via stimulated Raman induced Kerr lensing," *APL Photonics* **3**, 092501 (2018).
- [3] D. Raanan, L. Ren, D. Oron, and Y. Silberberg, "Impulsive Raman spectroscopy via precision measurement of frequency shift with low energy excitation," *Optics Letters* **43**, 470-473 (2018).
- [4] D. Raanan, X. Audier, S. Shivkumar, M. Asher, M. Menahem, O. Yaffe, N. Forget, H. Rigneault, and D. Oron, "Sub-second hyper-spectral low-frequency vibrational imaging via impulsive Raman excitation," *Optics Letters* **44**, 5153-5156 (2019).
- [5] Shivkumar, Siddarth, Dekel Ranann, Samuel Metais, Sisira Suresh, Nicolas Forget, Randy Bartels, Dan Oron, and Hervé Rigneault. "Selective Detection in Impulsive Low-Frequency Raman Imaging Using Shaped Probe Pulses." *Physical Review Applied* 19, no. 5 (2023): 054075.

Tests statistiques pour l'analyse d'acquisitions hyperspectrales codées

Trung-Tin DINH^{1,2}, Hervé CARFANTAN¹, Antoine MONMAYRANT², Simon LACROIX²

¹ : IRAP, Université de Toulouse/CNRS/CNES, 14 Avenue Édouard Belin, 31400 Toulouse, France

² : LAAS-CNRS, Université de Toulouse/CNRS, 7 Avenue du Colonel Roche, 31400 Toulouse, France
 tdinh@irap.omp.eu

1. Contexte

Les techniques conventionnelles d'imagerie hyperspectrale requièrent un nombre élevé d'acquisitions et nécessitent un balayage spatial ou spectral pour remplir le cube (x, y, λ) de données de l'image hyperspectrale. Dans notre projet, un imageur à masques codés pilotables de type DD-CASSI [1,2] permet de réduire considérablement le nombre d'acquisitions. Notre étude vise à optimiser l'analyse de la scène hyperspectrale en exploitant un faible nombre d'acquisitions codées, notamment pour des applications telles que la classification. À plus long terme, nous visons une acquisition adaptative, en pilotant les configurations du dispositif en fonction de la scène observée.

2. Méthode de reconstruction SA – Separability Assumption

Les données acquises ne permettent pas d'accéder directement à l'image hyperspectrale et nécessitent une étape reconstruction. Nous avons proposé [3] et validé sur données réelles [4] une approche de reconstruction s'appuyant sur une hypothèse de séparabilité de l'image hyperspectrale en régions spatiales homogènes. Selon cette approche, une région homogène se modélise à l'aide d'une carte d'intensité et d'un unique spectre, au lieu d'un spectre par pixel. Le défi réside dans la détermination des régions homogènes qui conditionne la qualité de l'analyse et de la reconstruction.

3. Analyse statistique des données codées – Détection des régions homogènes

Notre objectif principal est la détection automatique des régions homogènes dans la scène grâce à une analyse statistique. Dans cette étude, nous utilisons une image hyperspectrale de 110 bandes spectrales d'une scène contenant des briques LEGO inspirée de [4] (figure 1.a). Pour simuler 10 acquisitions codées de la scène nous utilisons SIMCA [5], un simulateur réaliste d'imageurs de type DD-CASSI, avec des masques binaires différents pour chaque acquisition. La figure 1.b présente l'une de ces acquisitions codées.

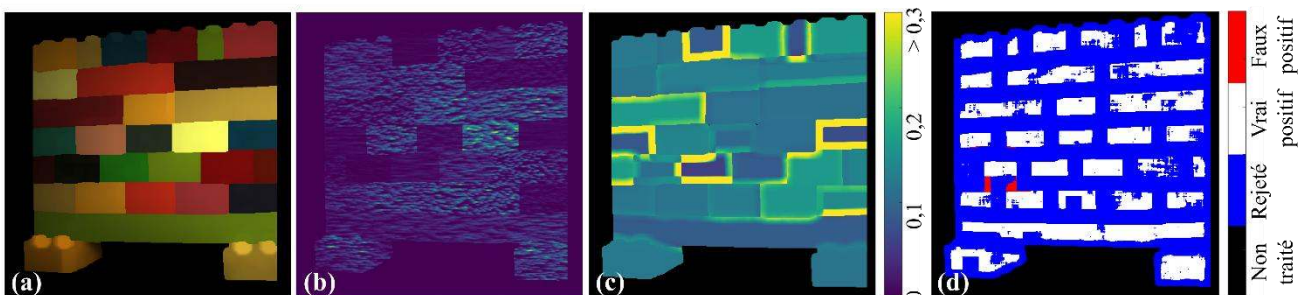


Figure 1 : (a) Scène observée en couleurs RGB ; (b) Une acquisition codée ; (c) Carte de SAM ; (d) Résultats du test de Shapiro-Wilk.

En réalisant un découpage spatial arbitraire par bloc (ici de 21×21 pixels) sur ces données codées et en considérant chaque bloc comme une région homogène, nous reconstruisons le cube hyperspectral par la méthode SA. Dans un cadre de simulations, l'évaluation de la qualité de reconstruction hyperspectrale peut se faire par le score de SAM (*Spectral Angle Mapper*) normalisé, une métrique

classique mesurant la similarité entre deux spectres, fournissant des valeurs entre 0 (forte similarité) et 1 (forte dissimilarité). La figure 1.c montre une carte de SAM entre le cube reconstruit et le cube de la vérité terrain. Nous observons que le SAM est relativement faible pour les blocs situés à l'intérieur des briques, indiquant une bonne reconstruction dans ces régions homogènes. En revanche, les blocs à cheval entre plusieurs briques correspondent aux valeurs de SAM élevées. En effet, ces blocs ne sont pas homogènes car ils contiennent plusieurs spectres différents.

En pratique, la vérité terrain est inaccessible, d'où notre objectif de développer une méthode d'analyse permettant la détection de régions homogènes directement à partir des données codées. Pour chaque bloc, nous pouvons reconstruire le spectre estimé par SA et simuler les données codées correspondantes, et analyser leur différence avec les données acquises (résidus). En prenant en compte l'hypothèse d'un bruit gaussien, nous exploitons des tests de gaussianité sur le résidu, par exemple un test de Shapiro-Wilk, pour valider l'hypothèse d'homogénéité du bloc. La figure 1.d illustre les résultats du test. Ces premiers résultats montrent la pertinence de ces tests dans les régions homogènes d'intensités élevées (représenté par les vrais positifs du test), mais révèlent une efficacité limitée dans les zones de faibles intensités (rejet du test). Notons également que les faux positifs (régions de mélange acceptées par le test) sont relativement limités. Dans ces zones principalement observées le long des contours des régions sombres, la domination du bruit peut conduire à la validation des tests, expliquant la fausse détection. Une piste proposée consiste en une classification binaire (région homogène ou de mélange) de ces résidus, exploitant des informations d'intensité, des métriques appropriées, et les statistiques des tests.

4. Perspectives

Dans notre contribution à la conférence, nous détaillerons le dispositif DD-CASSI et son modèle d'acquisition, ainsi que la reconstruction SA, les analyses statistiques des résidus mentionnées, et l'utilisation des tests de gaussianité.

Dans les perspectives à court terme, nous envisageons d'améliorer la reconstruction en réattribuant correctement les spectres de référence extraits des régions homogènes détectées. De plus, la classification supervisée et la détection de mélanges sont également envisagées en utilisant des tests statistiques. Dans le cas de la détection de mélanges, l'application des méthodes de démixage appropriées seront nécessaires.

À long terme, nous souhaitons obtenir des indications pour adapter les configurations du dispositif d'acquisition à la scène observée. En utilisant les analyses réalisées à bord de l'instrument, nous souhaitons caractériser la scène et prendre des décisions sur les configurations du dispositif tels que l'adaptation des masques de micro-miroirs, la durée d'acquisition ou d'autres paramètres pertinents.

5. Bibliographie

- [1] S. McGregor, S. Lacroix, A. Monmayrant, « Adaptive hyperspectral imager: design, modeling, and control », *Journal of Optics*, vol. 17, p. 085607, 2015.
- [2] E. Hemsley, S. Lacroix, H. Carfantan, A. Monmayrant, « Calibration of programmable spectral imager with dual disperser architecture », *Optics Communications*, vol. 468, p. 125767, 2020.
- [3] I. Ardi, « Reconstruction d'images pour un imageur hyperspectrale configurable », PhD thesis, Université Toulouse III - Paul Sabatier, Toulouse, France, 2020.
- [4] E. Hemsley, I. Ardi, T. Rouvier, S. Lacroix, H. Carfantan, A. Monmayrant, « Fast reconstruction of hyperspectral images from coded acquisitions using a separability assumption », *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 30, p. 8174-8185, 2022.
- [5] A. Rouxel, « Simulator for Coded Aperture Spectral Snapshot Imaging », soumis à JOSS <https://a-rouxel.github.io/simca/>

Assessment of compressive Raman spectroscopy to image and classify microplastics from natural marine environment.

C. Grand¹, C. Scotté¹ and H. Rigneault¹

¹Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Marseille, Institut Fresnel, Marseille, France
 clement.grand@fresnel.fr

Abstract

We report the imaging and the classification of micron sized polymer plastics particles coming from the natural marine environment using the compressive Raman technology. This technology enables sub-ms pixel dwell time Raman signal detection using binary spectral filters and single pixel detection. We successfully imaged and classified six types of marine micro-plastic particles collected on a silicon filter over an area of 1 mm² and with a 1 μm spatial resolution. This was achieved in a total acquisition time of less than two hours, with a pixel dwell time of 7 ms, which we have further reduced to 1.75 ms/pix in this paper. These analysis times are to be compared that with similar studies previously reported required a total acquisition time of more than 12h (and pixel dwell times > 100ms/pix).

1. Introduction

Conventional implementation of Raman hyperspectral imaging consists in dispersing spectrally the inelastic scattered light by each pixel of the sample onto an array detector (e.g. CCD, EMCCD). In many situations, the aim is to quantify chemical species whose pure Raman spectra are a-priori known. Raman imaging has now become a new imaging modality that can provide molecular level information in biological systems inaccessible by conventional optical techniques, from contrasts based on high chemical selectivity with superb optical resolution in “label-free” imaging. However, the weak Raman cross-section coupled with array detector noise and/or limited readout speed leads to long acquisition times and substantial data sets generation, therefore limiting further implementation to in-vivo applications. In this context, our aim is to improve spontaneous Raman efficiency, i.e. speed, while keeping its simplicity.

In our work, we replace the detector array with a single-channel detector coupled to a programmable spectral filter (DMD). The filters implemented on the latter are generated to minimize the estimation variance for each target species with known spectra. We demonstrate that the selecting of well-chosen combinations of wavelengths allows efficient estimation of the proportions of species with a simple pseudo-inversion. We validate the latter on solutions and on the imaging of microplastics within the collaborations framework for environmental reasons. The technique, thus named Compressive Raman technology (CRT), allows quantification with times reduced from ×10 to ×100, compared to conventional hyperspectral imaging on advanced spectrometers equipped with CCD or EMCCD sensors.

2. Implementation of Compressive Raman Technology (CRT)

The complete CRT setup is shown in *Figure 1a*) and described earlier in [1] [2]. It uses a 785nm CW laser (IPS – 100mW) to minimize parasitic fluorescence with a laser line filter integrated to reduce the bandwidth down to 0.3 nm (laser power was always fixed to about 60 mW at the sample plane), a two-axis galvanometric scanner (Cambridge Technology) and a commercial microscope stand (Nikon Eclipse) equipped with a ×20, NA = 0.75 objective lens (Nikon CFI Apo Lambda). This objective focuses the 785 nm excitation light and collects the back emitted/reflected Raman photons. The latter are de-scanned and separated from the excitation beam by a dichroic mirror and sent to a custom-built CRT spectrometer. At the spectrometer entrance a 785 nm notch filter (HSPF785.0 – Kaiser) rejects all the remaining laser and Rayleigh light. The CRT spectrometer is composed of a high transmission (~85%) grating (1200 lines/mm) that disperses the Raman photons towards a dispersive micromirror device (DMD Vialux V-650L NIR) with optimized NIR reflection. The binary encoded spectral filters displayed on the DMD send the Raman photons towards a single photon avalanche photodiode (SPAD-ID Quantique-ID120) with a 75% quantum efficiency at 800 nm. The galvo mirrors and image acquisition are controlled by a custom LabView based software. This software controls also the DMD display via the Vialux interface. The spectral resolution of the CRT spectrometer is estimated to be $\delta\lambda \approx 12$

cm-1 and the spatial resolution $1 \mu\text{m}$ (x,y) and $10 \mu\text{m}$ (z axis).

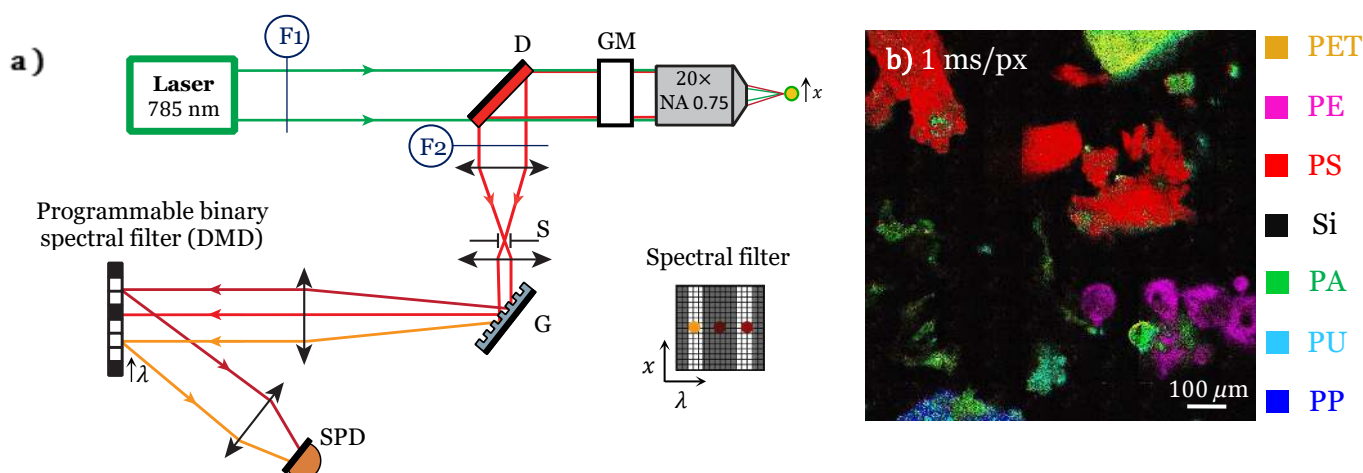


Figure 2. a) Simplified sketch of the developed NIR CRT setup (see also Fig. S1); D: dichroic mirror; GM: Galvanometric mirrors; S: confocal slit; G: amplitude grating (1200 lines/mm); DMD: digital micro mirror device; SPD: single pixel detector; F1: laser line filter, F2: notch filter. b) CRT imaging of MPs performed on a silicon filter substrate 1ms pixel dwell time for each of the seven spectral filters applied. Scale bar: $100 \mu\text{m}$, total FOV = $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ (1000 pixels \times 1000 pixels).

3. Microplastic imaging and classification

We have successfully evaluated the ability of the compressive Raman technology (CRT) to image and quantify microplastics (MPs) coming from natural marine environments (that are pigmented) in **Figure 1b**). CRT is different than conventional Raman imaging (that record the full Raman spectra) because CRT uses a priori known spectral information to design a limited (one per MP chemical species) set of spectral filters that can be used to perform fast imaging using a single pixel detector. Despite the countless difference that can exist between each type of plastic due to their added additive, there are only about ten major MP polymers released in the marine environment. This suits perfectly the CRT technology.

We have shown that CRT can image and classify MPs with a pixel dwell time as short as $250 \mu\text{s}/\text{pixel}/\text{filter}$ where each species could be detected and correctly identified. With 7 polymer species of MPs, this brings down the overall illumination pixel dwell time to 1.75 ms, a time which is $\times 10$ to $\times 100$ shorter than what is commonly used in MPs identification using conventional Raman spectroscopy and imaging [2] [3] [4].

In conclusion, we have shown that compressive Raman ideally suits the context of MPs detection for rapid imaging. Further improvements to increase imaging speed could be envisioned such as ‘region of interest predeterminations’ using white light images, sub-sampling (decreasing spatial resolution) or flow detection which would reduce the image to a line or even a point. These improvements are under investigation and could further established CRT as a game changer for MPs imaging and quantification for environmental and food applications.

4. References

- [1] C. Grand, C. Scotté, et H. Rigneault, « Fast Compressive Raman Imaging of Polymorph Molecules and Excipients in Pharmaceutical Tablets », *Anal. Chem.*, vol. 94, n° 48, p. 16632-16637, déc. 2022, doi: 10.1021/acs.analchem.2c02680.
- [2] C. Grand, « Compressive Raman imaging : applications in pharmacology and environmental sciences », These de doctorat, Aix-Marseille, 2022. Consulté le: 31 octobre 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.theses.fr/2022AIXM0537>
- [3] C. F. Araujo, M. M. Nolasco, A. M. P. Ribeiro, et P. J. A. Ribeiro-Claro, « Identification of microplastics using Raman spectroscopy: Latest developments and future prospects », *Water Research*, vol. 142, p. 426-440, oct. 2018, doi: 10.1016/j.watres.2018.05.060.
- [4] A. K  ppler *et al.*, « Analysis of environmental microplastics by vibrational microspectroscopy: FTIR, Raman or both? », *Anal Bioanal Chem*, vol. 408, n° 29, p. 8377-8391, nov. 2016, doi: 10.1007/s00216-016-9956-3.

Stimulated Raman Histology for Cancer detection using Stimulated Raman Scattering microscope

Y. Ahmad¹, L.J. de Leon¹, J. Wojak¹, R. André¹, S. Heuke¹, R. Appay^{1,2}, H. Rigneault¹

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

² : APHM, INP, Inst Neurophysiopathol, CHU Timone, Service d'Anatomie Pathologique et de Neuropathologie, Marseille, France

youssef.ahmad@fresnel.fr

Abstract

The adoption of Stimulated Raman Histology (SRH) introduces a multitude of advantages to the field of histopathology. Foremost, SRH eliminates the necessity for chemical stains, thereby preserving tissues in their natural state and facilitating the study of molecular and cellular processes without compromising specimen integrity. SRH is generated by Stimulated Raman Scattering microscope (SRS), therefore, we will explain our SRS setup which allows us to obtain images comparable to Hematoxylin and Eosin (H&E) stain. We have been using our setup to image and detect meningioma cancer on brain sample.

1. Introduction

Histology, the microscopic study of tissues, has been the tool in medical research, and pathology for well over a century. Traditionally, the gold standard for visualizing tissue microstructures has been the Hematoxylin and Eosin (H&E) stain. This staining method employs a combination of dyes, hematoxylin (blue) and eosin (pink), to highlight cellular and structural details within tissue sections. H&E staining has played a crucial role in the identification and characterization of cancers, and structural abnormalities in tissues [1]. Nevertheless, this technique has its limitations, including the need for time-consuming and potentially toxic chemical procedures, which can sometimes alter tissue integrity. However, in recent years, advancements in imaging techniques have ushered in a new era in the field of histology. One of the most revolutionary developments is stimulated Raman histology (SRH), which offers a label-free, non-destructive, and high-resolution alternative to traditional H&E staining. In SRH, SRS, a phenomenon in which laser light interacts with molecular vibrations in the sample, yielding highly specific and informative signals, is harnessed to generate virtual H&E-like images [2]. SRH is a technique that focuses on imaging the CH₂ and CH₃ chemical bonds within a sample. SRH offers a distinctive spectral fingerprint for various tissue components, including lipids, proteins, and nucleic acids. By leveraging these molecular vibrations, SRH generates virtual H&E-like images, allowing researchers and pathologists to visualize tissue microstructures and cellular details with remarkable precision.

2. Implementation of SRS

An illustration of our experiment can be seen in figure 1 [3]. Our primary light source is a passively mode-locked femtosecond solid-state laser. This laser emits light at a central wavelength of 1030 nm and possesses a spectral width of 15 nm. The 8.8 W output of this femtosecond laser is divided into five segments using two bandpass filters that are angle-tuned differently. The central portion (part 3) and the tails (part 1 and part 5) of the laser, see figure 1, undergoes frequency doubling within a SHG unit. This process results in 2.6 W of light at a wavelength of 515 nm, which is utilized to drive an optical parametric oscillator. The OPO produces an output power of 290 mW, which functions as the pump beam for initiating the SRS process. In order to interact with Raman resonances spanning from 500 to 5000 cm^{-1} , the OPO's wavelength can be adjusted between 650 and 980 nm. The laser at 1026 nm and 1034.4 nm, depicted in figure 1 as parts 2 and 4 of the fs-laser, respectively, function as the Stokes beams. These beams are subjected to modulation using electro-optical modulators operating at frequencies of 13 MHz and 20 MHz for parts 2 and 4 respectively. Both the Stokes beams and the pump beam are overlapped both in time and space using delay lines and mirrors, then combined into a custom made laser scanning microscope (LSM). The three colors are simultaneously focused onto the sample using an objective lens. After blocking the Stokes beams by filters, detection of Stimulated Raman Loss (SRL) is achieved using a reverse-biased photodiode. This photodiode collects the pump beam from the OPO and is collected by a condenser lens. The signals resulting from SRS are demodulated using a dual-channel lock-in amplifier at frequencies of 13 MHz and 20 MHz. This process produces two distinct SRS images corresponding to the two specific Raman resonances of interest. These resonances are determined by the frequency difference between the pump and Stokes 1, as well as between the pump and Stokes 2. To address the CH₂ and CH₃ vibrational bonds, we set the OPO's wavelength to 793 nm and we fixed the Stokes' wavelength to 1026 nm and 1034.4 nm.

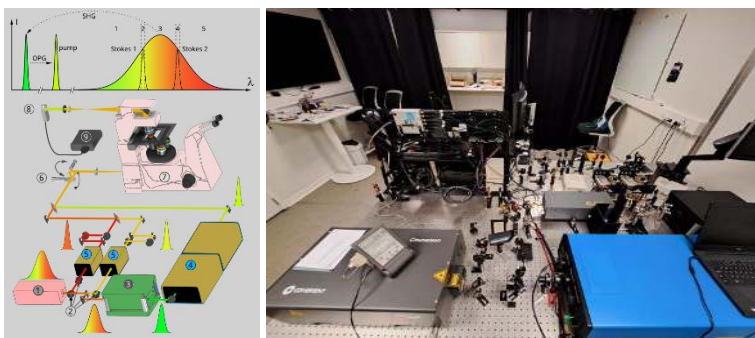


Fig. 1: (Left) Setup: 1) passively mode-locked Yb fs-laser, 2) ultra-steep angle-tunable filter, 3) second harmonic generation (SHG) unit, 4) OPO, 5) Electro-optic modulator (EOM), 6) Laser scanning mirrors, 7) Laser scanning microscope (LSM), 8) photodiode(s) (PD) with polarizing beam splitter, 9) Lock-in-amplifier (LIA). (Right) The real setup in the lab.

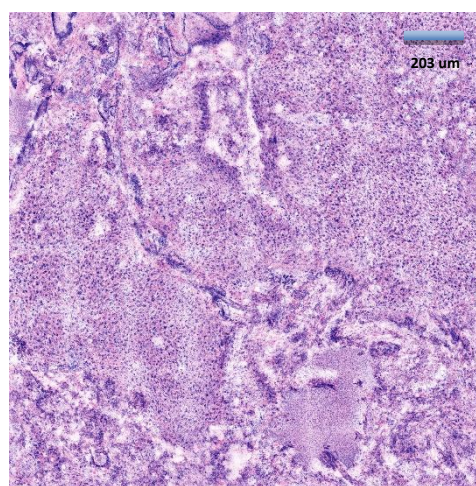


Fig. 2: Virtual H&E mosaic image of a brain cancer sample. 8 by 8 tiles, pixel dwell time of 10 microseconds, FoV of 1.624 mm, acquisition of 4, and 512 pixels. The mosaic image took 17 minutes to capture.

3. Résultats

A Virtual H&E mosaic image of a brain cancer (Meningioma) sample is shown in figure 2.

4. Conclusion

In this contribution we showed that it is possible to generate virtual H&E images by harnessing SRS. We are currently developing our SRH setup further by implementing machine learning to identify the

cancer tissues and give more details about the samples.

5. Bibliographie

- [1] Runz, M., Rusche, D., Schmidt, S. et al. Normalization of HE-stained histological images using cycle consistent generative adversarial networks. *Diagnostic Pathology* 16, 71 (2021).
- [2] A.T. Feldman, D. Wolfe. *Tissue Processing and Hematoxylin and Eosin Staining*. National Center for Biotechnology Information, vol 1180. Humana Press, New York, NY. (2014).
- [3] Heuke, S., Rimke, I., Sarri, B., Gasecka, P., Appay, R., Legoff, L., Volz, P., Büttner, E., & Rigneault, H. Shot-noise limited tunable dual-vibrational frequency stimulated Raman scattering microscopy. *Biomedical Optics Express*, 12(12), 7780. (2021).

Elastic waves in soft matter : a physical approach to cochlear tonotopy

S. Croquette¹, A. Delory^{1,2}, C. Prada¹, F. Lemoult¹
¹ : Institut Langevin, ESPCI Paris, CNRS, Université PSL
² : PMMH, ESPCI Paris, CNRS, Sorbonne Université
 samuel.croquette@espci.fr

Résumé

The study of guided waves in soft materials with simple geometries is motivated by the exploitation of their singular and various properties in the biological world. One of the most revealing examples is the cochlear wave travelling along the basilar membrane in the mammalian inner ear, that is responsible for the acoustic transduction phenomenon, and thus the sense of hearing. We developed a macroscopic experimental platform to probe the cochlear mechanics: a simple gradient waveguide made of a viscoelastic layer and two water chambers. In this thin strip geometry, the fundamental flexural mode propagates much slower than sound in water. We explain the passive cochlear tonotopy by the coupling of the strip with the fluid-filled cavities and by the geometrical gradients along the waveguide: the slowdown of the pressure wave as it propagates gives rise to localized displacement of the strip depending on the input frequency.

1. Introduction

The cochlea is the organ of the inner ear of mammals that is responsible for the sense of hearing. The input sound induces a *cochlear wave* that travels along the basilar membrane, causing the sensory cells attached to it to vibrate [1]. We are interested in the passive mechanisms that explain the logarithmic repartition of the input frequencies along the cochlea, the so-called tonotopy.

2. Experimental setup and methods

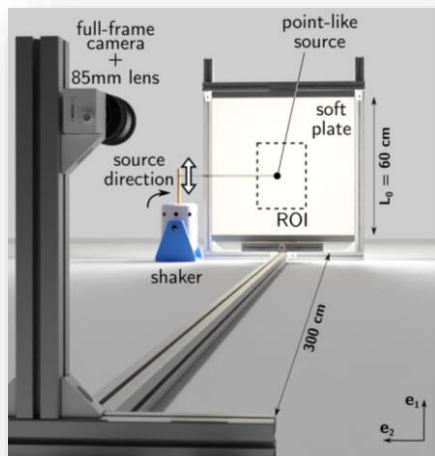


Figure 1 : Experimental setup, adapted from [3]

A monochromatic source generates a pressure wave that induces vibrations in a soft strip surrounded by two water chambers. By making use of stroboscopy, we acquire movies of the propagation of the wave along the strip. A Digital Image Correlation algorithm allows us to extract the displacement maps, from which we isolate the different propagative modes using an SVD decomposition and spatial Fourier transform.

3. Main results

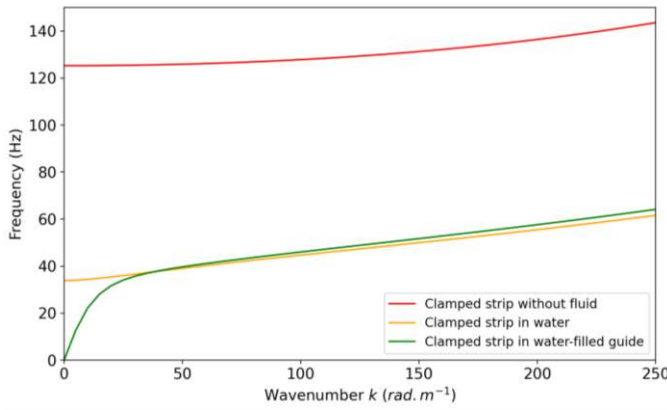


Figure 2 : Numerical simulations of the dispersion diagram for a clamped strip with no geometrical gradients

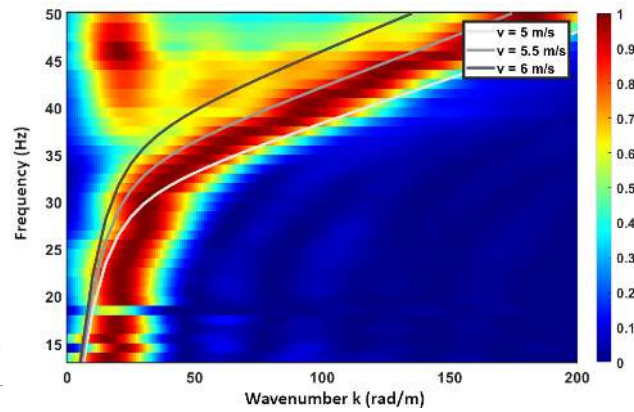


Figure 3 : Experimental dispersion diagram for a clamped strip with no geometrical gradients, surrounded by two water chambers

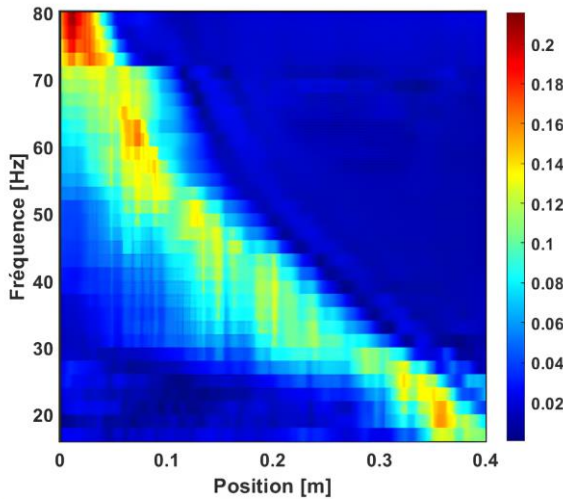


Figure 4 : Displacement for a width gradient (5mm-15mm)

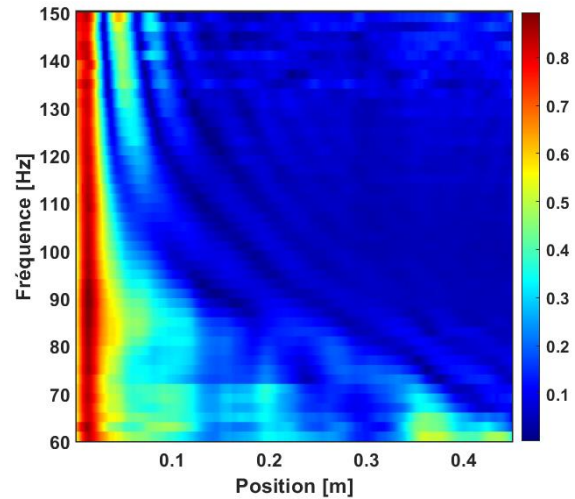


Figure 5 : Displacement for a thickness gradient (5mm-2mm)

4. Conclusion

We explain the passive cochlear tonotopy with the slowing down of the group velocity in a simple gradient waveguide made of a viscoelastic layer and two water chambers. The perspectives include implementing other gradients, taking into account the anisotropy and rheology of the basilar membrane, as well as exploring the active properties of the cochlea.

5. Bibliography

- [1] Fettiplace, Hackey. "The sensory and motor roles of auditory hair cells" Nat. Rev. 7 (2006)
- [2] Fay, Dallos, Popper. "The Cochlea", Springer New York (1996)
- [3] Delory et al.. "Soft Elastomers: a playground for guided waves" JASA 151 (2022)
- [4] Lanoy et al.. "Dirac cones and chiral selection of elastic waves in a soft strip" PNAS 117 (2020)

Stimulated Raman Histology: from tissue to diagnosis

L.J. de Leon¹, Y. Ahmad¹, J. Wojak¹, R. André¹, R. Appay^{1,2}, H. Rigneault¹

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

² : APHM, INP, Inst Neurophysiopathol, CHU Timone, Service d'Anatomie Pathologique et de Neuropathologie, Marseille, France

lazaro.deleon@fresnel.fr

Abstract

Histology is at the heart of brain tumor diagnosis and consists of removing a small sample of brain tissue to be analyzed. Hematoxylin and Eosin (H&E) staining of tissue stands as the gold standard technique in biopsy enabling experts to determine the cancerous nature. However, this cumbersome and time-consuming process (1-24 hours) prevents optimal patient care during the operation. An alternative technique known as Stimulated Raman Histology (SRH) has been reported to provide images comparable to H&E staining in a significantly shorter time. SRH images are acquired using Stimulated Raman Scattering (SRS). Two Raman shifts 2845 cm^{-1} and 2930 cm^{-1} corresponding to CH_2 and CH_3 chemical bonds are imaged and channel subtraction ($\text{CH}_3\text{-CH}_2$) is performed to highlight the nuclei presence in tissue. The present work proposes to digitally stained SRH image by using CH_3 and $\text{CH}_3\text{-CH}_2$ as inputs for a Beer-Lambert-law based algorithm. Moreover, benchmarking of a multilayer perceptron was performed for image classification of seven brain tumor types. The model was evaluated at patch level with an overall accuracy of 96.55%.

1. Introduction

Central nervous system tumors (CNST) are major public health issues responsible for high mortality and morbidity [2]. Although CNST have a distinct appearance, some of them are very difficult to differentiate. H&E staining, considered as the gold standard technique in histology, allows to differentiate nuclei and cell bodies. Hematoxylin binds to nuclei cells whereas Eosin binds cell bodies respectively. As a result, nuclei appear in blue/ dark violet and cell bodies appear in pink. This technique allows the pathologist to establish a preliminary diagnosis that is crucial for treatment, however, it is an arduous and time consuming task. Stimulated Raman Histology (SRH) has recently emerged as an alternative, label-free microscopy technique that uses SRS to generate images of cellular regions. Images are then virtually colored to mimic H&E coloring codes. The term SRH was first introduced by Orringer et al., in 2017 [4]. This method has been proved to reveal essential diagnostic features with an accuracy exceeding 92% for brain cryogenic sections. The distinction is made by imaging two wavenumbers by SRS at 2845cm^{-1} and 2930cm^{-1} corresponding to CH_2 and CH_3 chemical bonds. CH_2 groups are generally present in lipids whereas CH_3 are abundant in proteins and regions where DNA is methylated. SRH removes from the diagnostic workflow the transfer of the specimens out of the operating room to the laboratory for sectioning, mounting dyeing and interpretation. In addition, tissue preparation is non-destructive, therefore the same specimen can be used in further procedures such histo-chemistry or molecular biology.

2. SRH pipeline

The brain tumor tissue samples are scanned using the SRS microscope as described in Appay *et al.*, 2023 [1]. The raw files are uploaded to the online application tool SRHDB, developed by the Mosaic team at Institut Fresnel, that performs the preprocessing, virtual staining and stitching of the different tiles to generate a mosaic of SRH. For each tile, both channels are subtracted to generate an image that contains the nuclei. Eventually, all images are field flattened and contrast is enhanced by histogram stretching (Fig.1a). The algorithm based on Beer-Lambert law, proposed by Giacomely *et al.*, 2016[3], is used to produce the virtually stained images. Once the mosaic is finished it is available online for the histopathologist to perform remote diagnosis and annotation.

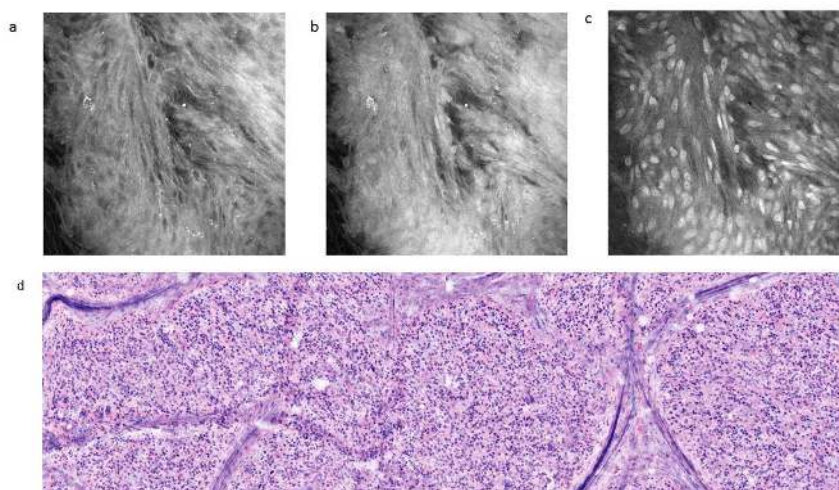


Figure 1. Preprocessing of raw images obtained from the SRS microscope. CH_2 channel (a), CH_3 channel (b), are subtracted and $CH_{\text{subtraction}}$ (c) is obtained. The mosaic of SRH tiles (d) is generated by stitching all the tiles together.

3. Benchmarking a multilayer perceptron for brain tumor SRH images classification

In order to build a classifier to deliver AI- assisted diagnosis at patch level for seven classes of tumor, three different architectures of a multilayer perceptron are benchmarked. The perceptron is fed, in all cases with an image feature vector of 2895 features (e.g. pixels statistics, images derivative, contrast features...) The vectors are computed using WND-CHRM software [5], for each patch. The vectors are stored in a dataframe containing 5220 samples. The models are designed for a 7-class task classification, a classical categorical cross entropy is used as loss. Several other metrics, accuracy, precision, recall, is computed to evaluate the performance of the classification algorithm. All the three models converge to a high and stable accuracy and a low stable categorical cross entropy loss (Table 1).

Table 1: Summary of the metrics used for the evaluation of the MLP

Model	Loss	Accuracy	Precision	Recall	F1-score	K-fold accuracy
MLP1	0.10	0.96	0.97	0.95	0.96	0.97
MLP2	0.13	0.96	0.96	0.96	0.96	0.93
MLP3	0.42	0.95	0.95	0.93	0.94	0.95

4. Conclusion

In this contribution, we propose a pipeline to perform SRH, describing the preprocessing of the data, the virtual staining process as well as the online available tool used to generate the virtual images and to share them with specialists for diagnosis. Moreover, we present a machine learning model that classifies with considerable accuracy the different images into seven classes of brain tumor.

6. Bibliography

- [1] Romain Appay et al. “Live Stimulated Raman Histology for the Near-Instant Assessment of Central Nervous System Samples”. In: *J. Phys. Chem. B* (Apr. 2023)
- [2] L. M. DeAngelis. “Brain tumors”. In: *N. Engl. J. Med.* 344.2 (Jan. 2001), pp. 114–123. ISSN:0028-4793.
- [3] Giacomelli MG, Husvogt L, Vardeh H, Faulkner-Jones BE, Hornegger J, Connolly JL, et al. (2016) Virtual Hematoxylin and Eosin Transillumination Microscopy Using Epi-Fluorescence Imaging. *PLoS ONE* 11(8): e0159337
- [4] Daniel A. Orringer et al. “Rapid intraoperative histology of unprocessed surgical specimens via fibre laser-based stimulated Raman scattering microscopy”. In: *Nat. Biomed. Eng.* 1.0027. (2017). ISSN: 2157-846X.
- [5] Lior Shamir et al. “Wndchrn – an open source utility for biological image analysis”. In: *Source Code Biol. Med.* 3.1 (Dec. 2008)

Faire progresser l'imagerie du sein grâce à la fusion de données et à l'apprentissage par transfert : une exploration complète

V. Noël^{1,2}, T. Rodet², D. Lesselier¹

¹ : Université Paris-Saclay, CNRS, CentraleSupélec, Laboratoire des signaux et systèmes

² : Université Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay, CNRS, Systèmes et Applications des Technologies de
l'Information et de l'Energie
valentin.noel@centralesupelec.fr

Résumé

La convergence entre la physique et les réseaux neuronaux transforme profondément l'imagerie du sein. Nos travaux ont pour but de reconstruire de manière conjointe deux modalités afin de augmenter la détection précoce des tumeurs du sein. Nous avons développé des algorithmes permettant reconstruire conjointement une image micro-onde, une image acoustique et une image de segmentation conjointe au deux modalités. Les algorithmes que l'on propose utilise le transfert learning pour améliorer l'apprentissage de d'une modalité à partir de l'autre. L'approche d'apprentissage par transfert améliore la classification des lésions mammaires en transférant des connaissances entre différentes physiques et modalités.

1. Introduction

En imagerie médicale, l'apprentissage à partir de réseaux de neurones a fait progresser beaucoup de problématiques et en particulier les problèmes de segmentation d'images. Le transfert learning des perspectives très intéressantes dans le cas ou nous possédons pas assez de données une modalité. Dans notre cas d'étude nous allons compléter l'information provenant de la tomographie micro onde, qui a beaucoup de difficultés pour capter les hautes fréquences de l'image par une imagerie complémentaire : l'imagerie acoustique. Nous avons déjà développé un algorithme de reconstruction conjoint basé sur un inférence bayésienne [1]. Ici nous allons résoudre le même problème en utilisant des méthodes d'apprentissage basées sur les données. Le principe de notre approche consiste à avoir deux réseaux de neurones l'un pour résoudre le problème électromagnétique et l'autre pour résoudre le problème acoustique. Afin d'améliorer les performances de ces réseaux en particulier sur la modalité électromagnétique ou la collecte des données est plus difficile, nous avons développer un troisième réseaux de neurones qui permet de connecter les deux espaces latents des précédents réseaux. Nous pouvons de cette manière faire un transfert d'apprentissage entre les deux modalités.

2. Description de la structure étudiée

Nous considérons dans notre étude que le sein est plongé dans un liquide ayant de bonne propriétés de transmission des ondes acoustiques et électromagnétique afin de pouvoir faire les acquisitions simultanément. Le problème que l'on étudie est considéré comme bidimensionnel nous excitons le système par des ondes de compression pour la modalité acoustique et par des ondes en polarisation Transverse - Magnétiques pour la modalité électromagnétique. On stimule le systèmes par des ondes harmonique dans les deux modalités ce qui nous conduit à résoudre les mêmes équations appliqués à deux modalités différentes. A l'aide de ces mesures nous pouvons remonter aux propriétés du sein en particulier à sa permittivité complexe relative pour les ondes magnétiques (permittivité et conductivité), et à la vitesse du son et son atténuation pour les ondes acoustiques. Les différents transducteurs permettant de faire ces mesures sont placés sur deux cercles concentriques placés autour de l'objet d'intérêt comme le décrit sur la figure 1 ci dessous.

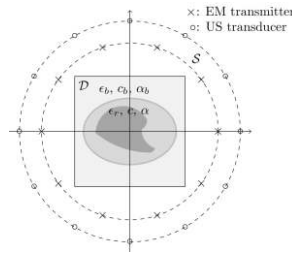


Figure 1 : Schéma de la configuration.

3. Description des Réseaux de Neurones étudiés

3.a) Réseau de Neurones en Cascade

Dans un premier temps nous avons résolu le problème en utilisant des réseaux de neurones permettant de résoudre le problème conjoint. On suppose donc que l'on possède à la fois les données acoustiques et les données électromagnétique pour les phases d'apprentissage et de test de l'algorithme. Pour ce faire nous avons utiliser des réseaux de neurones de l'état de l'art comme le réseau Res-Net. Mais nous avons aussi développé des réseaux qui tiennent mieux compte de la physique des problème (CNN-MM) et des réseaux cascades qui permettent de mieux prendre le compte la morphologie commune aux deux modalités (SACC-CNN). Les différents résultats de ces approches sont résumés dans la tableau 1.

3.b) Apprentissage par Transfert Bayésien (Fusion)

Notre deuxième approche consiste à faire du transfert learning entre les deux modalités qui nous intéressent. Ici nous avons deux réseaux dont les espaces latents sont connectés ensemble par un troisième réseau bayésien. Après une phase d'apprentissage ou l'on possède toutes les données pour entraîner les trois réseaux. On peut reconstruire les images de acoustique et électromagnétique uniquement avec les données acoustique grace au transfert learning que nous avons mise en place. Cette approche améliore la qualité des résultats et établit un cadre précis et complet pour l'apprentissage par transfert de la fusion des données. Le cadre exploite la nature complémentaire des données EM et ultrasonores, aboutissant à une analyse améliorée de l'imagerie mammaire via deux réseaux, nommés BBTL et BBFTL (Bayesian Bridge (Fusion) Transfer Learning).

4. Résultats

Les résultats d'intersection sur l'union (IoU) démontrent la supériorité des approches proposées dans les problèmes d'inversion de fusion de données et d'intégration de connaissances physiques par rapport aux réseaux de pointe. L'approche en cascade excelle en termes d'IoU pour différents types de tissus, illustrant sa robustesse (c.f. Tableau 1). Similairement, le RMSE de la prédiction des paramètres acoustiques et diélectriques est illustré dans le Tableau 2.

Network	Medium	Skin	Fat	Transition	Gland	Tumor	Average
Res-Net	0.9972	0.8361	0.8635	0.4221	0.6779	0.7089	0.7533
CNN-MM	0.9948	0.8341	0.8604	0.4192	0.6768	0.7151	0.7511
SACC-CNN	0.9967	0.8358	0.8621	0.4200	0.6781	0.7165	0.7529
PG-SACC-CNN	0.9989	0.8379	0.8660	0.4219	0.6798	0.7183	0.7545

Network	ϵ_r'	ϵ_r''	c	α
VGG-16	0.0805	0.0671	0.0371	0.0333
InceptionV3	0.0602	0.0503	0.0278	0.0249
AlexNet	0.0745	0.0621	0.0343	0.0308
EfficientNet	0.0671	0.0560	0.0309	0.0277
BBTL	0.0652	0.0544	-	-
BBFTL	0.0544	0.0454	0.0251	0.0225

Tableau 1 et 2 : IoU (gauche) et RMSE (droite) de différents réseaux de neurones sur le set de test

5. Conclusion

Ces méthodologies innovantes d'intégration de connaissances physiques dans les réseaux neuronaux produisent des résultats robustes en imagerie mammaire. Le réseau en cascade fusionne de manière robuste les sources de contraste et les quantités de champ, améliorant la sensibilité au cancer du sein. Les fonctions de perte ajustées consciemment renforcent la résilience et l'interprétabilité du réseau.

6. Bibliographie

- [1] Qin, Y., et al., "Fused microwave and ultrasonic breast imaging within the framework of a joint variational Bayesian approximation," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 70, No. 12, 12199-12211, 2022.
- [2] Kononenko, I., "Bayesian neural networks," *Biol. Cybern.*, Vol. 61, No. 5, 361-370, 1989.
- [3] Noël, V, et al., "Breast imaging by cascaded CNN from joint microwave and ultrasonic data," *IEEE EUSIPCO*, 917-921, 2022.

Noise correlation elastography for full field optical imaging systems

N. Dufour¹, M.Legrand¹, E. Martins Seromehno¹, A. Nahas¹

¹ : ICube Research Institute, CNRS - University of Strasbourg, 67085 Strasbourg, France
 n.dufour@unistra.fr

Resume

The stiffness of a biological tissue is a great indicator of its health state. Thus, adding quantitative stiffness to medical imaging systems could be a strong aid for diagnosis, notably in cases of small lesions or inaccessible tissues. In our team, we developed noise correlation elastography for full field coherent imaging technics such as digital holography or FFOCT. This allow us to perform full field quantitative stiffness and mechanical anisotropy mapping without the need for a controlled or synchronized source of mechanical wave. To validate the method as well as the algorithm, we worked on finite difference simulations mimicking both isotropic and anisotropic media..

1. Introduction

The stiffness of a biological tissue is a great indicator of its health state. Elastography has already proved its clinical usefulness to quantify tissue stiffness with ultrasound and MRI methods [1]. Since the introduction of elastography in OCT [2], several methods for elastography have been adapted to optical setups. We propose here a method to perform full field quantitative stiffness without the need for a controlled or synchronized source of mechanical wave.

2. Noise correlation elastography

Inspired from seismology [3], noise correlation elastography is a method that consists in refocusing a field from the spatiotemporal correlation of a diffuse shear-wave displacement film. Information about the local shear-wave celerity are obtained by this refocusing. As the shear-wave celerity and medium elasticity are linked, a quantitative elasticity map can be retrieved. In the case of an isotropic media, the shape of the local refocusing is a round spot from which is directly linked to the local mean wavelength λ_0 . Considering a noise field, the shear-wave celerity c_s is known if the central noise frequency f_0 is known, as $c_s = f_0 \times \lambda_0$ [4].

In our team, we developed noise correlation elastography for contactless full-field coherent imaging technics such as digital holography or FFOCT [5]. This approach is particularly well adapted to full field optical imaging technics and inherently provides in-plane anisotropy images.

3. Results on tissue-mimicking simulations

Our algorithm is first tested on tissue-mimicking finite-difference simulations. 300x300 pixels simulations are made over 500 frames with a frame rate of 500 Hz to match the camera settings used for our experiments. Results on isotropic simulations are displayed Figure 2.

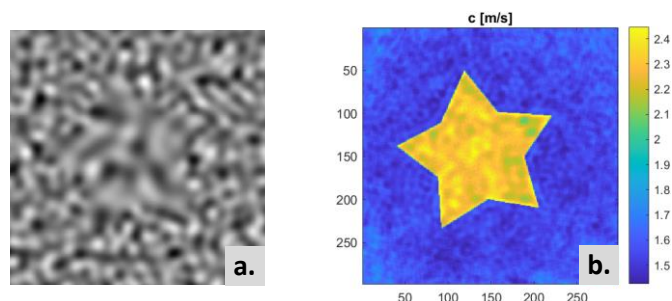


Figure 2. (a.) is a frame from a isotropic medium simulation movie with a stiffer star-shaped inclusion in the center. (b.) is the corresponding celerity map retrieved with noise-correlation.

Here, a star inclusion, where the wave celerity is fixed at 2.25 m.s^{-1} , is in a softer homogeneous media with a wave celerity at 1.5 m.s^{-1} . The celerity map is retrieved with the noise correlation algorithm. The result obtained validate our method on isotropic media simulation as celerity values correspond to simulated ones with a high resolution on the inclusion.

As mentioned before, noise correlation allows to retrieve the in-plane anisotropy. We present in Figure 3 a bi-sided simulation where the anisotropy direction is different in each side. In both, the lower celerity is 1.5 m.s^{-1} and the higher one is 2.25 m.s^{-1} . Celerities were successfully retrieved which validate our method on anisotropic media.

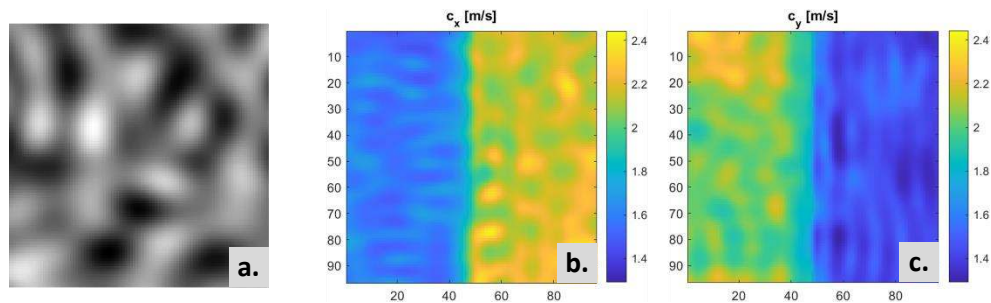


Figure 3. (a.) is a frame from a bi-sided anisotropic medium simulation movie with different anisotropy ratio on each side. (b.) and (c.) are celerity map following respectively the x- and y-axis.

4. Conclusion

We presented here our results on simulations for noise correlation elastography. This method has shown its potential on isotropic media as well as to estimate the in-plane anisotropy. It is now tested on experimental data in order to adapt the method to endoscopy.

5. Bibliography

- [1] Bercoff J, Chaffai S, Tanter M, Sandrin L, Catheline S, Fink M, Genisson J-L, and Meunier M, “In vivo breast tumor detection using transient elastography,” *Ultrasound in medicine and biology*, vol. 29,11, 2003.
- [2] Schmitt J, “Oct elastography : imaging microscopic deformation and strain of tissue,” *Optics express*, vol. 3,6,1998.
- [3] Gallot T, Catheline S, Roux P, Brum J, Benech N, and Negreira C, “Passive elastography : shear-wave tomography from physiological-noise correlation in soft tissues,” *IEEE*, vol. 58,6, 2011.
- [4] Marmin A, Catheline S, and Nahas A, “Full-field passive elastography using digital holography,” *Optics Letters*, vol. 45, no. 11, pp. 2965–2968, 2020.
- [5] Marmin A, Laloy-Borgna G, Facca S, Gioux S, Catheline S, and Nahas A, “Time-of-flight and noise correlation-inspired algorithms for full-field shear-wave elastography using digital holography,” *Journal of Biomedical Optics*, vol. 08, no. 26, 2021.

Optical Metrology Instrument Based on Low Coherence Interferometry for High Precision Applications

I. Khan¹, M. Lequime¹, A. Bolliand¹, M. Zerrad¹, and C. Amra¹

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

imran.khan@fresnel.fr

Abstract

We present an optical instrument based on low coherence interferometry for the accurate determination of the spectral and angular dependence of back-reflected light from optical surfaces. Moreover, this instrument also allows the determination of wedge angle of an optical window with few arcseconds accuracy.

1. Introduction

Interferometric techniques are a powerful tool for accurate metrology of high precision optical systems. Furthermore, an interferometric instrument with balanced photo detection scheme allows improved signal to noise ratio due to the suppression of relative intensity noise of the input light source. Here in this work, we show by using an optically balanced low coherence interferometer, the measurement of optical (angular and spectral dependence of the coefficient of reflection) and geometrical (wedge angle) properties of smooth optical interfaces.

2. Description of the instrument

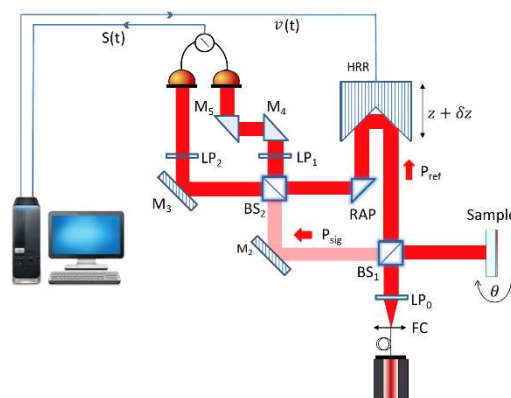


Figure 1. Optical layout of the instrument.

Figure 1. shows the optical scheme of the instrument. A balanced optical interferometer consisting of two arms named, ref (reference), which can be linearly translated and sig (signal) with a broadband light

source (super luminescent diode - SLD) illumination allows the recording of very low level of light back-reflected and back-scattered from optical surfaces. The sample arm assembly can be accordingly used to perform different kinds of characterizations i.e., optical or geometrical properties of samples.

3. Results

The lowest level of measured coefficient of reflection from a bare N-BK7 window is on the order of 10^{-10} and the measured angular dependence of back-reflectance of light from a Silver coated mirror is on the order of 10^{-11} . While, the lowest recordable value of spectral dependence of the reflection coefficient of an anti-reflective coated window is between 80 ppb and 1.6 ppm with tunable spectral resolution from 0.2 nm to few nanometers. Moreover, accurate determination of wedge angle of optical components can be achieved with accuracy on the order of few arcseconds.

4. Conclusion

This instrument is capable of accurately quantifying the metrological performance of optical components both in terms of optical and geometrical properties for high precision applications.

5. Acknowledgments

The authors would like to thank the AMIdex Talents Management Program, Aix Marseille University and the French National Space Center (CNES) for their financial support.

6. Bibliography

- [1] I. Khan, M. Lequime, M. Zerrad, and C. Amra, “*Detection of Ultra-Low Light Power Back-reflected or Back-scattered by Optical Components using Balanced Low Coherence Interferometry*,” *Phys. Rev. Applied* **16**, 044055 (2021).
- [2] M. Lequime, I. Khan, M. Zerrad, and C. Amra, “*Low coherence interferometric detection of the spectral dependence of the reflection coefficient of an anti-reflective coated interface*,” *Opt. Express* **31**, 8748-8774 (2023).
- [3] M. Lequime, I. Khan, A. Bolliand, M. Zerrad, and C. Amra, “*Low-coherence interferometric measurement of the spatial frequency dependence of the light field backscattered by optical interfaces*,” *Appl. Phys. Lett.* **122**, 191103 (2023).
- [4] I. Khan, M. Lequime, A. Bolliand, M. Zerrad, and C. Amra, “*Direct Determination of the Wedge Angle of an Optical Window using Optically Balanced Low Coherence Interferometer*,” in preparation.

Posters GT4

Prothèse de genou instrumentée à l'aide d'un implant électronique RFID passif

A. Vena¹, S. Cahuzac^{1,2}, S. Dutrieux^{1,2}, S. Naudi², B. Sorli¹
¹ : Institut d'Electronique et des Systèmes (IES),
² : Bonetag
 arnaud.vena@umontpellier.fr

Résumé

Cet article présente un implant électronique basé sur la technologie RFID UHF passive qui s'insère dans une prothèse orthopédique de genou. Il se compose d'un circuit intégré AMS SL900A connecté à une antenne miniaturisée adaptée à l'environnement biologique pour fournir un identifiant unique pouvant être utilisé pour la traçabilité des implants. En outre, il intègre un capteur de température, et le circuit intégré est connecté à un capteur externe basé sur une membrane capacitive pour détecter un descellement précoce de la prothèse avec le tibia et le fémur. La taille totale de l'implant RFID est de 12,7 mm x 11,9 mm pour une épaisseur de 3 mm. Ces travaux sont validés par des mesures pratiques.

1. Introduction

La technologie RFID passive a été étudiée récemment pour le développement de dispositif médical implantable actif (DMIA) [1] dans les bandes de fréquences HF [2] et UHF [3-4]. Elle a notamment été utilisée récemment pour détecter des fissures [3] ou des inflammations profondes [4] sur des fixations de plaques osseuses. Ces études récentes ont prouvé qu'il était possible d'établir une communication entre un implant RFID et un lecteur externe à travers le corps humain et en présence de métal à proximité de l'implant.

Le travail présenté dans cet article consiste à créer un implant instrumenté et communicant, fonctionnant in-vivo, autonome en énergie, et pouvant être associé à une prothèse orthopédique de genou [5] (voir Fig. 1 (a)). Cet implant doit pouvoir remplir deux fonctions principales : l'identification de la prothèse et la détection précoce du dysfonctionnement de la prothèse (infection des bio-tissus, descellement entre l'os et la prothèse). Pour l'identification de la prothèse, la technologie RFID UHF passive a été choisie pour sa très faible consommation d'énergie, ce qui permet de concevoir un implant sans batterie. Cet aspect est relativement important si l'on considère qu'une prothèse du genou est destinée à être portée pendant 20 ans en moyenne sans aucune intervention chirurgicale. La puce RFID choisie est dotée d'un capteur interne de température et d'une interface de mesure capacitive que nous utilisons pour la détection d'une perte d'adhésion précoce.

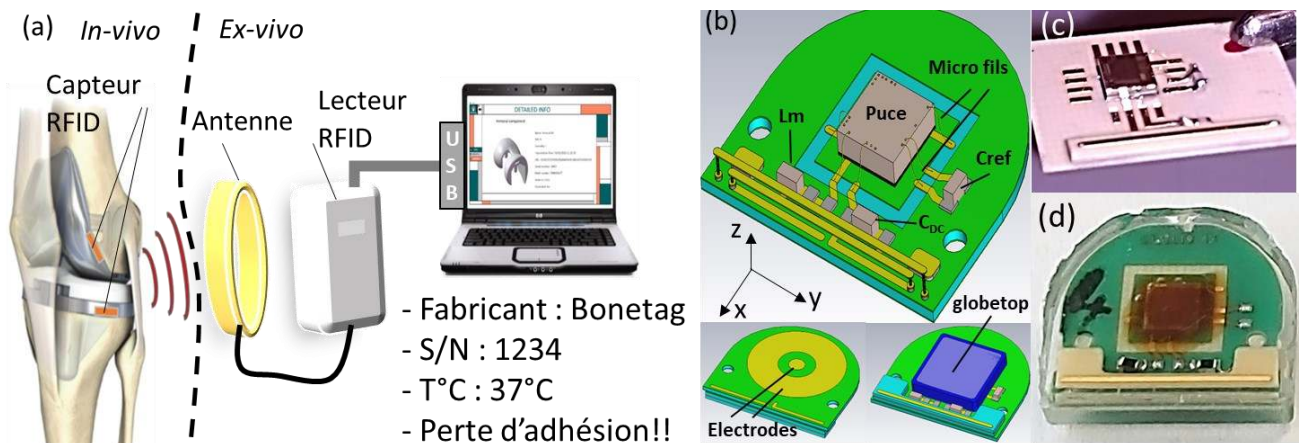


Figure 1. Géométrie de l'antenne

2. Conception d'un implant RFID miniaturisé

Les Fig. 1 (b) et (c) montrent l'implant composé de l'antenne, d'une puce RFID AMS SL900 sans boîtier et de quelques composants passifs. La Fig. 1 (d) montre la dernière version de l'implant avec son encapsulation. La géométrie de l'antenne est basée sur une antenne boucle (2 tours) réalisée dans le plan vertical y-z à l'aide d'un circuit imprimé composé de quatre couches conductrices. Cette topologie compatible

avec la présence de métal tout autour permet un rayonnement privilégié dans une direction parallèle au substrat. La dimension maximale de l'antenne est 12.9mm, soit $0,04\lambda$ à 900 MHz, et son impédance est égale à $Z_{ant} = 6,5 + j185$ à 900 MHz en espace libre, mais elle augmente de manière significative lorsqu'elle est entourée de tissus biologiques pour atteindre $Z_{ant}=32+j233$. En parallèle, nous avons mesuré une impédance complexe pour la puce $Z_{ic}=36-j262$. Pour optimiser le coefficient de transfert de puissance entre la puce et l'antenne, nous avons placé une capacité en série de valeur 9,1pF entre la puce et l'antenne.

3. Résultats

La distance de communication du prototype présenté sur la Fig. 1 (d) placé dans un liquide fantôme simulant le corps humain ($\epsilon_r=55$ et $\text{cond.}=1\text{S/m}$) a été mesurée avec un lecteur Voyantic Tagformance Pro (voir Fig. 2 (a)). Les résultats sont présentés dans la Fig. 2 (b) pour une distance de séparation allant de 0 à 60 mm. Dans le cas le plus favorable (0 mm) la puissance d'émission pour activer l'étiquette est proche de 14 dBm. Dans le pire des cas (60 mm) la puissance d'émission est au-dessus de 29 dBm.

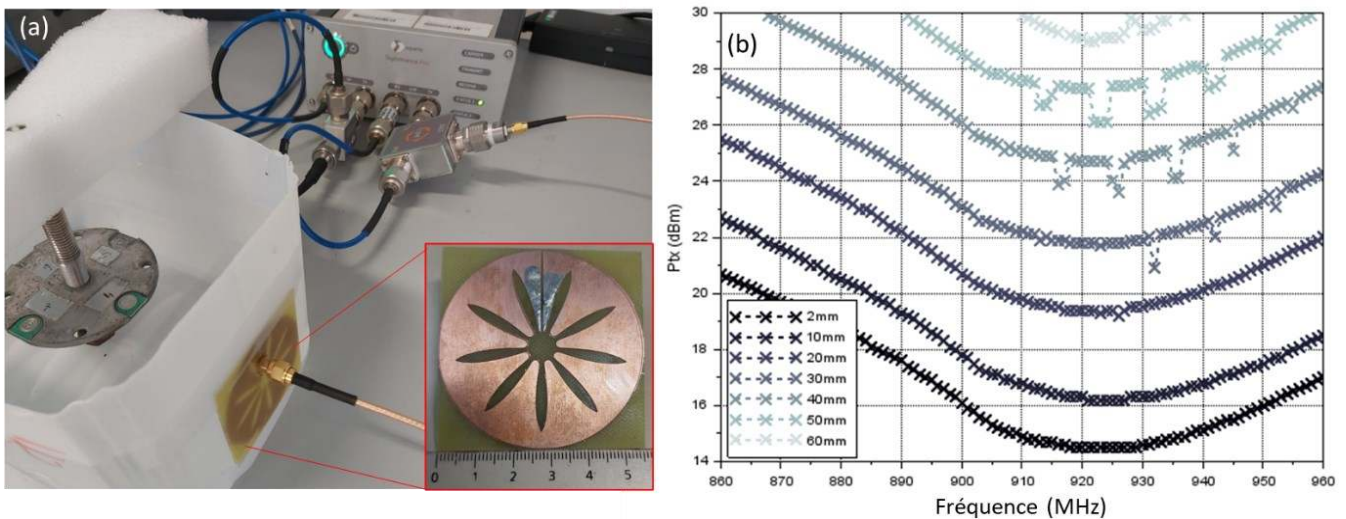


Figure 2. Résultats de mesure de transmission

4. Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté un nouveau concept d'implant RFID UHF passif miniaturisé destiné à être inséré dans une prothèse métallique de genou. Une géométrie d'antenne adaptée à la proximité du métal et à la variabilité de la permittivité complexe des tissus biologiques a été proposée. Les résultats de mesures de distance de communication dans un liquide fantôme ont montré qu'une communication entre l'implant RFID in-vivo et un lecteur externe est possible jusqu'à une distance de 60mm avec une puce RFID doté de fonctionnalités capteurs et ayant une puissance d'activation de - 5 dBm.

6. Bibliographie

- [1] Foster K and Jaeger J, RFID Inside, *IEEE Spectr.*, vol. 44, no. 3, pp. 24–29, 2007.
- [2] Lazaro A., Boada M, Villarino R, and Girbau D, Feasibility Study on the Reading of Energy-Harvested Implanted NFC Tags Using Mobile Phones and Commercial NFC IC, *IEEE IMBioC.*, Toulouse, France, Dec. 2020.
- [3] Nappi S, Gargale L, Naccarata F, Valentini P-P, and Marrocco G, A Fractal-RFID Based Sensing Tattoo for the Early Detection of Cracks in Implanted Metal Prostheses, *IEEE J. Electromagn. RF Microw. Med. Biol.*, vol. 6, no. 1, pp. 29–40, 2022.
- [4] Avaltroni P, Nappi S, and Marrocco G, Orthopedic Fixture-integrated RFID Temperature Sensor for the Monitoring of Deep Inflammations, *IEEE RFID*, Atlanta, GA, USA, Apr. 2021.
- [5] Vena A, Sorli B, Cahuzac S, and Naudi S, Prosthetic implant and method for the production of such an implant, *WO/2018/015513*, Jan. 25, 2018.

Métasurface reconfigurable pour l'estimation de la direction d'arrivée

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

¹ : LEME, UPL, 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 proposons un dispositif basé sur une métasurface reconfigurable pour estimer la direction d'arrivée d'une onde électromagnétique. La métasurface est utilisée comme un réflecteur où un profil de phase parabolique reconfigurable est appliqué pour des directions de pointage afin de faire converger les faisceaux incidents vers un point focal. La direction d'arrivée est estimée par la direction de pointage correspondant à la puissance maximale reçue par une antenne réceptrice placée au point focal.

1. Introduction

Les métasurfaces ont attiré une attention considérable depuis la dernière décennie en raison de leur capacité à manipuler les ondes électromagnétiques que ce soit en réflexion ou en transmission [1]. Dans ce papier, nous exploitons l'utilisation d'une métasurface reconfigurable [2] pour estimer la direction d'arrivée d'une onde électromagnétique. La métasurface est utilisée comme un réflecteur parabolique plane dont la direction de pointage peut être modulée en modifiant le profil de phase appliqué, pour faire converger des faisceaux incidents vers un point focal. La direction de pointage correspondant à la puissance maximale reçue par une antenne réceptrice placée au point focal du réflecteur permet ainsi d'estimer la direction d'arrivée.

2. Description de la métasurface reconfigurable

Une vue schématique de la métasurface utilisée, ainsi que le principe de fonctionnement du réflecteur parabolique virtuel sont présentés sur la Figure 1a.

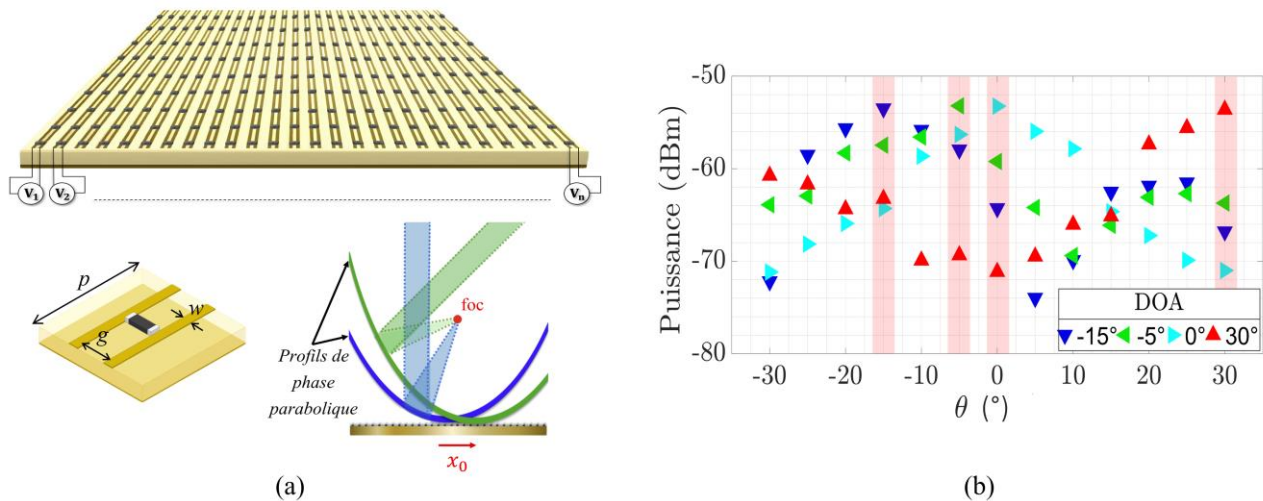


Figure 1. (a) Structure de la métasurface reconfigurable et principe de fonctionnement du réflecteur parabolique virtuel. (b) Puissance reçue par l'antenne réceptrice pour chaque configuration de profil de phase parabolique, pour des directions d'arrivée du signal de -15° , -5° , 0° et 30° .

Les dimensions de la métasurface sont de $180 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$ et elle est composée de 30×30 cellules élémentaires de périodicité $p = 6 \text{ mm}$. Chaque cellule est composée de deux pistes en cuivre

d'une largeur $w = 0,5$ mm séparées par un espacement $g = 1,9$ mm et imprimées sur un substrat diélectrique d'une épaisseur de 1,52 mm et de permittivité relative $\epsilon_r = 4,5$. Une diode varactor commandée en tension est montée entre les pistes. En accordant électroniquement la tension continue à polarisation inversée appliquée à la diode varactor, la capacité est modifiée, permettant ainsi de contrôler les réponses électromagnétiques de la métasurface.

3. Résultats expérimentaux

La méthode proposée pour l'estimation de la direction d'arrivée se fait en plusieurs étapes. La première étape consiste à utiliser la métasurface combinée avec une antenne patch au point focal comme une antenne émettrice à balayage électronique. Ainsi, une table de dépointages correspondants à des variations du profil de phase parabolique de la métasurface est obtenue. Ensuite, la deuxième étape consiste à utiliser la métasurface combinée avec l'antenne patch comme un récepteur où la direction de pointage peut être balayé en faisant varier le profil de phase appliqué. La source de rayonnement externe, qui simule la direction d'arrivée, est produite par une antenne cornet que l'on déplace autour de notre système de détection dans un rayon de 3 m pour des angles d'arrivées inclus entre -30° et 30° par pas de 5° , à une fréquence de 10 GHz.

Pour estimer la détection d'arrivée, une série de profils de phase distincts est appliquée à la métasurface pour faire un balayage de pointage. La Figure 1b présente les résultats expérimentaux obtenus pour les tests. On peut y voir les niveaux de puissance mesurés, par un analyseur de spectre branché à l'antenne patch réceptrice, lors de l'application des profils de phase parabolique à la métasurface pour les directions d'arrivée de -15° , -5° , 0° et 30° . Les résultats obtenus montrent bien que le maximum de puissance est détecté lorsque l'orientation du profil de phase parabolique de la métasurface est alignée sur la direction d'arrivée de l'onde, validant ainsi l'approche proposée.

4. Conclusion

La méthode proposée exploite la possibilité des métasurfaces dans la manipulation des ondes avec les principes de focalisation des réflecteurs paraboliques. Cette étude offre une alternative prometteuse et simple pour estimer la direction d'arrivée en utilisant une métasurface reconfigurable où la direction de pointage peut être modulée en modifiant le profil de phase appliqué.

6. Bibliographie

- [1] C. L. Holloway, E. F. Kuester, J. A. Gordon, J. O'Hara, J. Booth, D. R. Smith, An overview of the theory and applications of metasurfaces: The two-dimensional equivalents of metamaterials, *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. **54**, pp. 10-35, 2012.
- [2] B. Ratni, A. de Lustrac, G.-P. Piau, S. N. Burokur, Reconfigurable meta-mirror for wavefronts control: applications to microwave antennas, *Opt. Express*, vol. **26**, no 3, pp. 2613-2624, 2018.

Fabrication monolithique d'un filtre passe bande à cavités bi-mode en SLM dans la bande K

Bastien Peres^{1,3}, Pierre Lemaître-Auger², Fabien Schwartz³, Tan Phu Vuong¹

¹ : Université Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, Grenoble INP, IMEP-LaHC, Grenoble, France,

² : Université Grenoble Alpes, Grenoble INP, LCIS, Valence, France,

³ : AML Microtechnique Lorraine, Metz, France

bastien.peres@grenoble-inp.fr

Résumé

Le travail présenté détaille l'optimisation d'une structure de filtre passe bande d'ordre 4 à cavités bi-modes. Cette optimisation permet la fabrication du filtre en une pièce tout en diminuant les pertes d'insertion. Le filtre est destiné à être fabriqué par le procédé de Selective Laser Melting (SLM) pour fonctionner à 24 GHz avec une bande passante relative de 1% et des pertes par retour inférieures à -22 dB.

1. Introduction

De nombreux travaux ont été menés sur l'utilisation des technologies de fabrication additive pour réaliser des filtres à cavités résonantes [1]–[3]. Parmi elles, la technologie de fusion sur lit de poudre permet d'obtenir un filtre fonctionnel avec le moins d'étapes de fabrication et avec les meilleures performances en termes de pertes d'insertion et de capacité à supporter des niveaux de puissance élevé. Parmi les différents procédés de cette technologie, le Selective Laser Melting (SLM) a été choisi pour réaliser le filtre présenté dans ce travail car il offre une faible rugosité comparé aux autres procédés [4]. Néanmoins les inconvénients de cette technologie font que le filtre est relativement lourd comparé à son équivalent fabriqué en matière plastique et la rugosité de surface est importante allant jusqu'à plusieurs dizaines de microns suivant l'angle de fabrication. Dans ce travail, de nouvelles formes géométriques que la fabrication additive autorise, comme le passage d'iris de forme rectangulaire à une forme elliptique [5] ou l'adaptation des ports d'entrée / sortie pour permettre une fabrication en une seule pièce sans support sont utilisées pour fabriquer un filtre d'ordre 4 à cavités bi-modes. L'objectif étant de minimiser les zones où la rugosité de surface serait plus importante due à l'angle de fabrication et de diminuer les pertes d'insertion du filtre.

2. Description de la structure étudiée

Le filtre étudié est présenté en Fig.1. Les cavités résonantes sont en forme de cône tronqué avec des demi-sphères de chaque côté pour permettre une fabrication sans supports. Les cavités terminées par des demi-sphères ont un angle très faible par rapport au plateau de fabrication aux extrémités et l'utilisation d'iris de forme elliptique permet de diminuer cette zone où la rugosité de surface est plus importante en fixant un diamètre minimum w_h de 4,4 mm comme illustré en Fig.1c alors que l'iris rectangulaire en Fig.1b a une largeur w_h de 1,5 mm. La surface de métal au niveau des demi-sphères, avec la plus forte rugosité, est plus faible et a donc un impact moindre sur la Fig.1c comparé à la Fig.1a. Les couplages d'entrée / sortie sont aussi optimisés en Fig.1c pour ne plus avoir à utiliser de chanfreins qui devront être enlevé par usinage et concevoir directement une géométrie d'iris, avec une transition elliptique entre le guide d'accès et les iris d'entrée / sortie, en accord avec l'angle de fabrication minimum d'une machine de fabrication SLM.

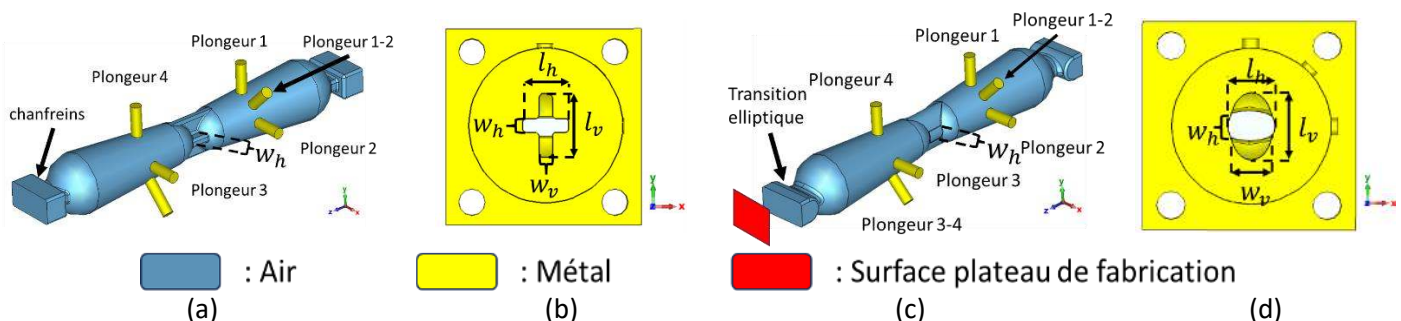


Figure 1. (a) Filtre proposé avec iris rectangulaire – (b) iris rectangulaire de couplage inter-cavité – (c) Filtre proposé avec iris ellipsoïdales – (d) iris ellipsoïdales de couplage inter-cavité

3. Résultats

Les résultats de simulation des structures présentées en Fig. 1 sont présentés en Figure 2. Le filtre sera fabriqué en titane TA6V et recouvert d'une couche argent de *LiCS coating* (Liquid Chemical Suspension) donc la simulation est réalisée en prenant la conductivité électrique de l'argent à $6,3 \times 10^7$ S/m et une rugosité de surface nulle permettant d'estimer la qualité du revêtement argent lors de la comparaison avec les mesures à venir. La simulation donne une réponse avec des pertes par retour inférieures à -22 dB et des pertes d'insertion autour de 0,35 dB avec une légère amélioration pour la structure en Fig. 1c.

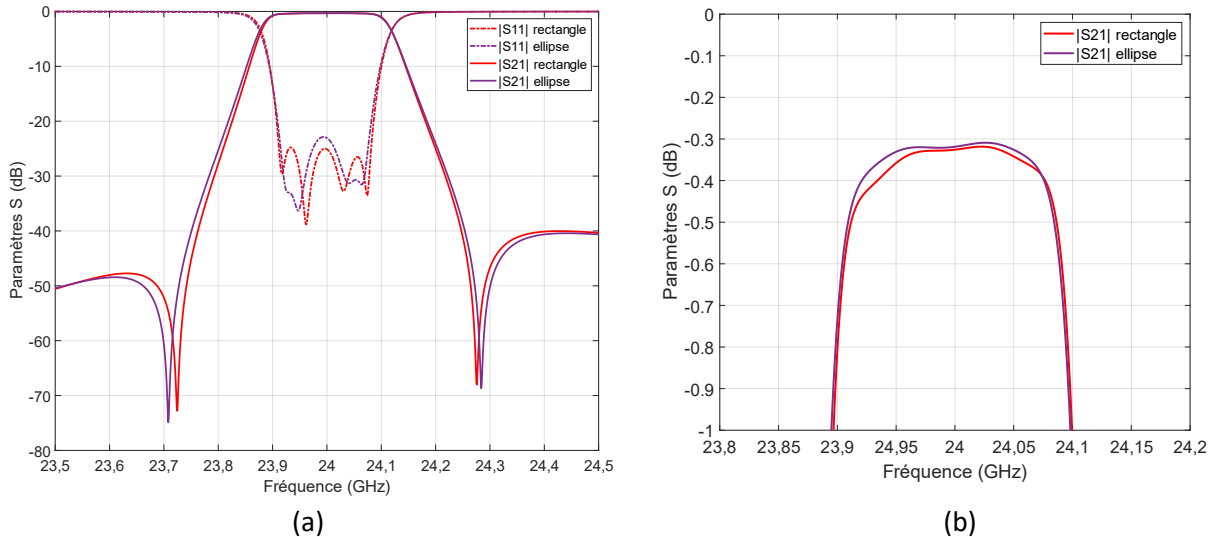


Figure 2 : Résultats de simulation de la structure étudiée – (a) Paramètres S – (b) Vue agrandie sur les pertes d'insertion dans la bande-passante

4. Conclusion

Dans cette contribution, nous avons montré l'utilité de la fabrication additive pour réduire les zones avec une forte rugosité de surface sur une filtre d'ordre 4 à cavités bi-modes en bande K et l'utilisation d'iris ellipsoïdaux pour diminuer les pertes d'insertion. La géométrie des couplages d'entrée / sortie est aussi adaptée à une fabrication monolithique sans support.

5. Bibliographie

- [1] E. Lopez-Oliver *et al.*, « 3-D-Printed Compact Bandpass Filters Based on Conical Posts », *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.*, vol. 69, n° 1, p. 616-628, janv. 2021, doi: 10.1109/TMTT.2020.3035168.
- [2] C. Guo, X. Shang, M. J. Lancaster, et J. Xu, « A 3-D Printed Lightweight X-Band Waveguide Filter Based on Spherical Resonators », *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 25, n° 7, p. 442-444, juill. 2015, doi: 10.1109/LMWC.2015.2427653.
- [3] P. Booth, « Additive Manufactured Bandpass Filters at Ka-band », in *2019 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP)*, juill. 2019, p. 7-9. doi: 10.1109/IMWS-AMP.2019.8880131.
- [4] F. Calignano *et al.*, « Overview on Additive Manufacturing Technologies », *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, n° 4, p. 593-612, avr. 2017, doi: 10.1109/JPROC.2016.2625098.
- [5] P. Booth et E. V. Lluch, « Enhancing the Performance of Waveguide Filters Using Additive Manufacturing », *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, n° 4, p. 613-619, avr. 2017, doi: 10.1109/JPROC.2016.2616494.

Etude et conception des métasurfaces reconfigurables en transmission intégrant des matériaux à changement de phase (PCM)

Wilfrid. Renkanga M¹, Cyril. Decroze¹, Georges. Humbert¹, Aurelian Crunteanu¹

¹ : Institut de recherche XLIM, CNRS, UMR 7252/ Université de Limoges, 87060, Limoges, France.
renkangambatchi@xlim.fr

Résumé

Nous présentons la conception d'une métasurface monocouche en transmission reconfigurable en bande W. Cette métasurface est composée 900 éléments (30x30) en forme d'anneaux fendus circulaire, avec une taille de grille d'élément de 1.5 mm (0.5λ) fonctionnant à 100 GHz et exploitant les propriétés des changements isolant-métal des matériaux à changement de phase (PCM). L'utilisation du tellurure de germanium (GeTe) intégré dans une fente du résonateur en anneau fendu imprimé sur un substrat diélectrique et son activation optique entre ses états isolant et métallique permet d'atteindre deux états de phase avec une différence de 180° . Le codage spatial de ces éléments sur la métasurface induit le changement de direction d'une onde transmise dans une direction particulière.

1. Introduction

Dans un contexte marqué par l'évolution rapide des technologies de communication, notamment avec l'avènement de la 5G et les perspectives de la 6G, centré sur le spectre sub-THz, l'optimisation des systèmes d'antennes devient cruciale. Une attention particulière est accordée aux surfaces intelligentes reconfigurables (RIS), visant à manipuler de manière dynamique les propriétés des ondes électromagnétiques pour répondre aux besoins évolutifs des réseaux de communication et système d'imagerie. Actuellement, les technologies tel que les diodes PIN[1], des MEMS [2] etc, bien que couramment utilisés dans l'état de l'art des RIS (transmitarray, reflectarray, polarisateur, FSS...), présentent des inconvénients majeurs tel que l'encombrement, l'inefficacité à très haute fréquences et une consommation énergétique élevée. Des travaux récents illustrent l'émergence prometteuse des métasurfaces bidirectionnelle reconfigurables à simple couche, combinant les caractéristiques dynamiques de rayonnement à la fois d'un un réseau d'antenne en transmission et en réflexion reconfigurable électriquement [3]. Face aux limitations énumérées plus haut, nous proposons une metasurface reconfigurable optiquement monocouche à 1 bit (0° ou 180°) exploitant les propriétés des PCM en bande-W. Cette approche tire parti des avantages intrinsèques des films de GeTe, offrant une intégration facile, des caractéristiques non volatiles (bistables) des états isolants (Off) et métalliques (On) ainsi qu'un changement réversible d'état, en utilisant l'activation optique [4].

2. Description de la structure étudiée

Sur la figure 1. a est présentée la structure de l'élément de codage au sein de l'ensemble de la métasurface reconfigurable en transmission, conçu sur une seule couche. Cet élément est constitué d'un anneaux fendus circulaire en métal ($R_0=0.3$ mm, $W_g=0.1$ mm) dans lequel un film mince de GeTe est intégré, le tout réalisé sur un substrat de saphir ($\epsilon_r=9.8$, $\tan\delta=0.00002$ et $h=0.1$ mm).

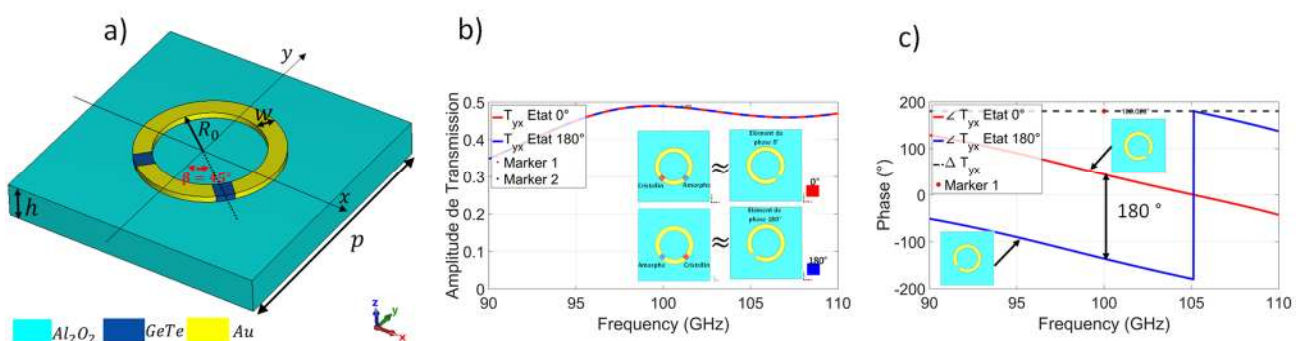


Figure 1. Conception et propriété de l'élément de codage à GeTe contrôlé optiquement. a) Cellule unitaire. b, c) Résultats de simulation des amplitudes et phases de transmission pour les deux état de codage de phase de l'élément.

La périodicité de l'élément p est de 1.5 mm (0.5λ) à 100 GHz. Les deux motifs de GeTe, agissant comme élément reconfigurable, sont disposés de manière symétrique de chaque côté de l'anneau fendu circulaire par rapport à l'axe y , avec un angle formé entre elle de 90° ($\beta=45^\circ$). Une telle configuration agit comme un convertisseur de polarisation linéaire grâce à la structure asymétrique créée par les deux états spécifiques du GeTe (isolant/ métal) [3]. CST Microwave Studio Suite a été utilisé pour obtenir les paramètres optimaux pour produire une amplitude de transmission maximale de 0.489 (soit 6.2dB) et une différence de phase entre cellules de 180° .

Afin de valider le balayage de faisceau de la métasurface, une étude numériques basée sur la théorie de réseaux d'antennes est investiguée à l'aide de l'outil MATLAB. L'outil permet de générer une répartition des phases de chaque état de la cellule unitaire (0° et 180°). La métasurface reconfigurable en transmission est composée de 30×30 éléments, alimentés par un cornet de directivité 10 dBi placé au centre de coordonné de la metasurface (0,0, F). F est défini comme la distance entre le centre de phase de l'antenne d'excitation et celui de la métasurface ($F=32.85$ mm), sa valeur a été choisie pour obtenir une efficacité optimale à $F/D=0.73$.

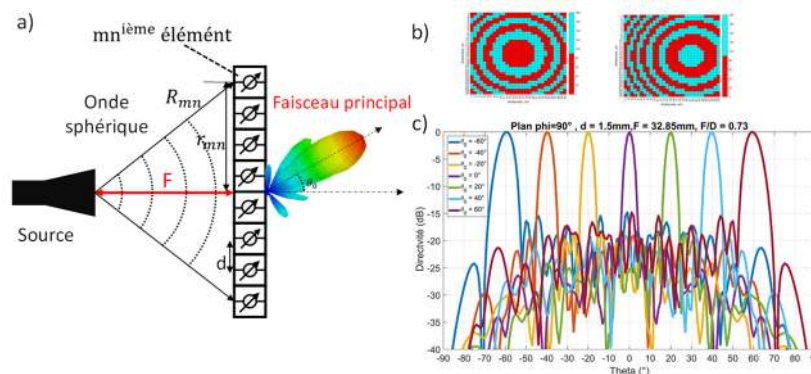


Figure 2. Analyse et synthèse de réseaux. a) système de cordonné. b) Codage de la distribution phase 1 bit sur chaque élément pour un dépointage dans l'axe et à 15° c) diagramme de rayonnement normalisé calculé sur la plage de dépointage de -60° à 60° par pas de 20° .

En utilisant MATLAB, la distribution de phase pour deux angles de dépointage sont générées et la directivité du réseau est calculée pour le cas d'un dépointage dans l'axe (29 dB) et d'un dépointage à 15° (28 dB).

3. Conclusion

Une conception d'une cellule unitaire reconfigurable optiquement est proposée. L'utilisation du GeTe comme élément reconfigurable permet d'obtenir deux états phase au sein de la cellule, soit 0° ou 180° . Les simulation complète de la métasurface de dimension 30×30 sous CST sont en cours afin de valider la structure en comparant les résultats obtenus par MALTAB aux mesures expérimentales.

4. Remerciements

Les auteurs remercient le soutien de la région Nouvelle Aquitaine (projet Smart-PCM) et du labex Sigma Lim (ANR-10-LABX-0074-01, projet Matris).

5. Bibliographie

- [1] A. Clemente, L. Dussopt, R. Sauleau, P. Potier, et P. Pouliguen, « Wideband 400-Element Electronically Reconfigurable Transmitarray in X Band », *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 61, n° 10, p. 5017-5027, oct. 2013, doi: 10.1109/TAP.2013.2271493.
- [2] T. Debogovic et J. Perruisseau-Carrier, « MEMS-Reconfigurable Metamaterials and Antenna Applications », *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2014, p. 1-8, 2014, doi: 10.1155/2014/138138.
- [3] M. Wang, S. Xu, F. Yang, et M. Li, « A 1-Bit Bidirectional Reconfigurable Transmit-Reflect-Array Using a Single-Layer Slot Element With PIN Diodes », *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, vol. 67, n° 9, p. 6205-6210, sept. 2019, doi: 10.1109/TAP.2019.2925925.
- [4] M. Pinaud, G. Humbert, S. Engelbrecht, L. Merlat, B. M. Fischer, et A. Crunteanu, « Terahertz Devices Using the Optical Activation of GeTe Phase Change Materials: Toward Fully Reconfigurable Functionalities », *ACS Photonics*, vol. 8, n° 11, p. 3272-3281, nov. 2021, doi: 10.1021/acsp Photonics.1c01086.

Mécanismes de rayonnement d'une antenne dipôle placée au-dessus d'un milieu diélectrique : l'importance de l'impédance de surface

T. Alves¹

¹ : ESIEE Paris UGE, chercheur associé ESYCOM (UMR 9007), 93162 Noisy-le-Grand
 thierry.alves@esiee.fr

Résumé

La prise en compte théorique de l'interface diélectrique à pertes que constitue un milieu biologique ou géologique est une tâche complexe dans la conception des antennes pour les applications IoT. Une compréhension des interactions peut facilement s'obtenir en utilisant une approche basée sur l'impédance de surface du milieu et l'impédance de l'onde incidente. L'objectif est alors de donner des lignes directrices pour la conception d'antennes destinées aux communications surface-surface et surface-intra du milieu diélectrique en prenant l'exemple du dipôle demi-onde horizontal.

1. Introduction : rendement, impédance de surface et impédance d'onde

Le rendement est l'un des principaux paramètres caractérisant le rayonnement d'une antenne. En espace libre les pertes (P_j) ne sont causées que par la conductivité finie des matériaux constituant l'élément rayonnant. La présence d'un milieu diélectrique entraîne une absorption partielle de l'énergie réactive et une perte supplémentaire apparaît (P_{abs}). Seule une fraction de la puissance fournie (P_f) est finalement rayonnée (P_{ray}). Le rendement s'exprime alors par :

$$\eta = \frac{P_{ray}}{P_f} = \frac{P_{ray}}{P_{ray} + P_j + P_{abs}}$$

Dans ce qui suit, on s'attachera à caractériser uniquement les pertes liées au milieu. Ainsi, les résultats présentés considèrent une antenne avec des conducteurs parfaits. Le milieu diélectrique est caractérisé par sa permittivité complexe qui découle de la présence simultanée des courants de conduction (J_c) et de déplacement (J_d) suivant un rapport noté p_m . L'impédance caractéristique de l'air étant Z_0 , celle du milieu en incidence normale est donnée par :

$$\underline{Z}_s = \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_r(1 - ip_m)}} \text{ soit } Z_s \approx \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \text{ si } J_d > J_c \text{ ou } \underline{Z}_s \approx \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \frac{1}{\sqrt{p_m}}(1 + i) \text{ si } J_c > J_d$$

L'étude considère un scénario BAN (Body Area Network) en bande ISM 2.4 GHz. Une antenne dipôle demi-onde constituée par deux rubans alimentés au milieu est dimensionnée selon une longueur (L) de 2×28 mm et une largeur (W) de 4 mm. L'impédance d'onde des champs rayonnés tant vers Z_0 en champ lointain mais cette relation est plus complexe dans la zone de champ réactive. En étroite proximité (distance inférieure à $\lambda/2\pi$), on peut considérer sur le long de l'antenne que l'impédance d'onde, à l'instar d'une ligne de transmission en circuit ouvert, est réactive en évoluant d'une valeur très grande aux extrémités (fort champ E, faible champ H) à une valeur nulle au centre (faible champ E, fort champ H). L'impédance d'onde est principalement résistive au centre de l'antenne tout en étant d'abord faible à sa proximité puis tendant vers Z_0 en champ proche non-réactif (distance inférieure à $\lambda/2$) [1], [2].

2. Structuration du milieu diélectrique

Dans un milieu homogène l'impédance de surface est égale à l'impédance caractéristique du milieu. Pour les milieux à concentration ionique non négligeable l'habitude est de prendre en moyenne $\epsilon_r \approx 50$ et $p_m \approx 0.5-1$. Mais dans une deuxième approche plus pragmatique, on doit considérer une stratification verticale du milieu, Fig.1, avec souvent une couche intermédiaire ou surfacique peu conductrice (asphalte, glace ordinaire, tissu adipeux, os : $\epsilon_r \approx 3-5$ et $p_m \approx 0.1$). Ce qui contraste avec le reste des couches conductrices (argile, eau, organes, liquide cébrospinal : $\epsilon_r \approx 15-80$ et $p_m \approx 1-10$). L'impédance de surface est alors liée à la contribution des différentes couches et se calcule par la méthode des lignes de transmissions équivalentes [3].

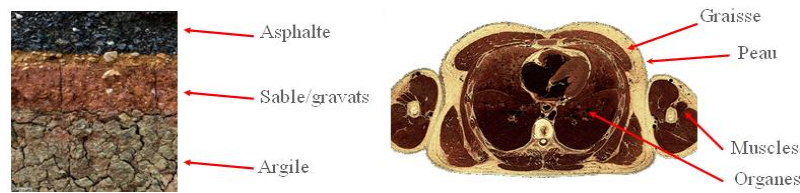


Figure 1. Géométrie des milieux diélectriques : sol urbain (à gauche), corps humain (à droite)

3. Résultats et interprétations

Les résultats de simulation concernant un milieu biologique constitué de muscle, d'une couche d'épaisseur variable h_{graisse} de tissu adipeux et d'une couche de peau de 0.5 mm sont présentés en Fig.2. La stratification entraîne une variation assez large de Z_s et le rendement est présenté pour 5 valeurs de hauteur d'antenne. Lorsque l'antenne est basse 1-4 mm, elle présente une impédance d'onde faible face au milieu et le rayonnement y pénètre lorsque Z_s est faible (adaptation). Ceci se produit pour $h_{\text{graisse}}=0$ et 25 mm. La désadaptation d'onde (réflexion) est maximisée lorsque Z_s est fort et le rendement quadruple autour de $h_{\text{graisse}}=12$ et 36 mm (résonances quart d'onde pair du tissu adipeux). La situation s'inverse lorsque l'antenne à une hauteur de $\lambda/2$ présente un champ quasi-formé et une impédance d'onde proche de 377Ω ; les résonances à $h_{\text{graisse}}=12$ et 36 mm laissent maintenant l'onde pénétrer le milieu et le rendement diminue quelque peu. Ces constatations sont la base du calcul de l'efficacité d'un blindage en CEM [4].

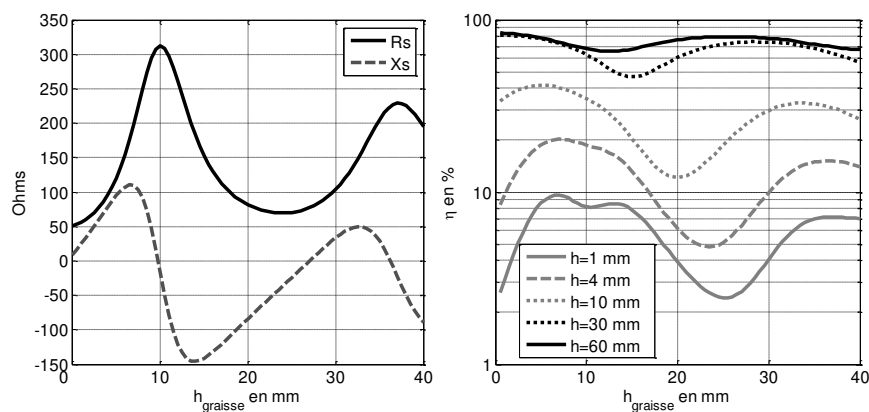


Figure 2. Impédance de surface (à gauche) et rendement (à droite) en fonction du tissu adipeux

4. Conclusion

Dans cette contribution, nous avons montré l'intérêt de confronter impédance d'onde et impédance de surface pour caractériser une antenne dans le contexte des systèmes communicants à proximité de milieux diélectriques. Aucun nouveau concept n'est clamé mais cette analyse du point de vue des conditions aux limites en termes d'impédance semblerait n'avoir encore jamais été appliquée dans ce contexte. Les constatations présentées peuvent conduire à l'étude de nouvelles surfaces bande étroite d'adaptation permettant de favoriser le rayonnement *intra* ou au contraire, des surfaces de désadaptation favorisant le rayonnement en *surface* ou dans l'air.

5. Bibliographie

- [1] BOOKER H. G., The Elements of Wave Propagation Using The Impedance Concept, *IET*, vol. **94**, pp. 171-198, 1947.
- [2] KING R. W. P. & HARRISON C. W. , *Antennas and Waves: A Modern Approach*, The M.I.T press, 1969.
- [3] WAIT J. R., *Electromagnetic Wave Theory*, Harper & Row, 1985.
- [4] SCHELKUNOFF S. A., The Impedance Concept and Its Application to Problems of Reflection, Refraction, Shielding and Power Absorption, *BSTJ*, vol. **17-1**, pp. 19-48, 1938.

EM Energy Harvesting Solution from Ambient Railway Communication Systems Based on Focusing Metasurfaces

Mohammed Kalaagi¹ and Divitha Seetharamdoo²

¹ Institut de Recherche Technologique Railenium, F-59300, Famars, France

² Université Gustave Eiffel, COSYS, LEOST, Univ, Lille Nord de France, F-59650 Villeneuve

D'Ascq, France

Mohammad.kalaagi@railenium.eu, Divitha.seetharamdoo@univ-eiffel.fr

Résumé

In this work, we investigate the potential of an EM energy harvesting system based on focusing metasurfaces to enhance the performance of off-the-shelf rectenna systems and to overcome the challenges of low power level harvested from ambient EM energy in railway environment. The metasurface is designed based on the hyperboloidal profile of the generalized law of refraction. Our energy harvesting system is deployed in the railway environment in three configurations: The receiving antenna of the rectenna along side the focusing metasurface, the antenna along side a metallic plate and the antenna alone. The focusing concept shows remarkable results compared to the other configurations with a receiving power up to 10 μW compared to that of the antenna with a metal plate and alone of 1 μW and 0.1 μW respectively.

1. Introduction

In this work the aim is to investigate the potential of electromagnetic energy harvesting in the railway environment. High sources of electromagnetic energy have been proven to exist in the railway infrastructure [1]. However, many challenges and limitations can rise especially at low microwave frequency ranges for railway EM energy harvesting technologies in terms of efficiency, reliability and implementation. The application is to be able to supply low input power devices such as IoT and WSNs. EH from GSM-R communication systems can be a use case to harvest and supply low input devices [2]. Using commercialized off the shelf rectenna systems to harvest ambient energy can be a challenge specially with the energy scattered and the low power that will be received by the antenna [3]. We propose a solution for such challenges by introducing a novel concept which can be a complementary solution for EM EH technologies based on EM energy focusing. The concept is defined by using an engineered focusing metasurfaces along side the EM energy harvesting system. The metasurface is designed based on the hyperboloidal profile and the Snell's generalized law of reflection [4]. The EH system is tested in an anechoic chamber. A gain in terms of received power is evaluated when using the focusing metasurface along side a commercialized EM rectenna system compared to that using a rectenna system alone. Furthermore, The system is implemented and on site for EM ambient energy harvesting in the railway environment. The measurements were carried on in collaboration with SNCF Réseau in Saint-Denis, Paris. The measurements and EM energy harvesting were done close to GSM-R (a component of the European Rail Traffic Management System) base stations deployed along the railway infrastructure. We implemented the system in the far-field to determine the potential of our system in terms of EM harvesting and the power level harvested. When using the focusing concept with the metasurface along side the rectenna, the system has shown remarkable results in terms of enhancing the power received by the commercialized rectenna system compared to that when implemented alone.

2. Description of the Device Setup in the Railway Environment

We deployed our EH system in the far-field away from the railway and GSM-R base station as shown in Figure 1. The GSM-R base station is transmitting continuously in the range of 920 MHz with a maximum power of -10 dBm. The first measurements were taken using the P2110b powercast rectenna device along side the focusing metasurface. In terms of harvesting, the rectenna system was able to receive 0.05 mW at some points in time during the measurements were taken which is equivalent to -13 dBm. However, since the max



Figure 1. Focusing metasurface device setup

value of transmitting base station of the GSM-R system is -10 dBm, the power received at the input of the rectifier is low compared its needed minimum level. Thus, an alternative rectifying can be used in this case with higher efficiency for better EM harvesting. The aim is to study the potential of the focusing metasurface and concept to increase the efficiency of the receiving system. Thus, we used a spectrum analyzer (SA), in order to detect and analyze the level of power for the different scenarios specially that the SA is capable of measuring low received input power.

3. Results of the power received by the P2110b

The measurements were carried out for three different configurations: the antenna of the rectenna device with the metasurface along its side, with a metal plate and the antenna alone. The results of the three configurations are shown in Figure 2. Figure 2 shows the results of the received power levels for the three configurations and scenarios. We can observe very clearly that the focusing metasurface has given

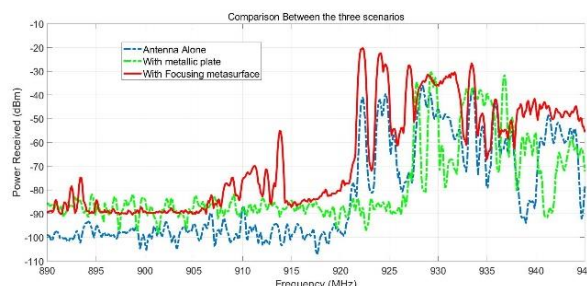


Figure 2. Power received versus frequency comparing the three configurations

significant enhancement in terms of improving the performance of such receiving or harvesting devices with a value of power received up to -20 dBm (10 μ W) compared to that of -30 dBm (1 μ W) and -40 dBm (0.1 μ W) with the metal plate and antenna alone scenarios respectively. Moreover, compared to other measurements in the literature [5], the max received power for GSM-R systems using conventional antennas was given to be -40 dBm. This shows the added value of the concept and physical properties of focusing metasurfaces, which can be beneficial to overcome difficulties and challenges in ambient EM energy harvesting environment specially performances of rectenna devices and efficiency. However, for higher values of received power, an antenna with higher gain and better aperture to harvest the focused energy can be used such as a vivaldi antenna, in order to increase the level of harvested power.

4. Conclusion

In this work we tested on site the potential of our concept based on focusing metasurfaces to enhance the performance of off the shelf rectenna systems, and overcome the challenges of low efficient ambient EM energy harvesting especially at GSM frequencies. The system was deployed in three configurations: The receiving antenna along side the focusing metasurface, the antenna along side a metallic plate and the antenna alone. The focusing concept showed remarkable results compared to the other configurations with a receiving power up to 10 μ W compared to that of the antenna with a metal plate and alone of 1 μ W and 0.1 μ W respectively. The level of 10 μ W however can be relevant for the application to supply WSNs which is the minimum required input power for such devices. For higher performances, an antenna with higher gain and aperture can be used to harvest the focused energy along side an efficient rectifying circuit.

6. Bibliographie

- [1] M. Heddebaut, V. Deniau, and J. Rioult, "Wideband analysis of railway catenary line radiation and new applications of its unintentional emitted signals," *Measurement Science and Technology*, vol. 29, , 2018.
- [2] E. Dallago, A. Danioni, M. Marchesi, and G. Venchi, "An autonomous power supply system supporting low-power wireless sensors," *IEEE transactions on power electronics*, vol. 27, no. 10, pp. 4272–4280, 2012.
- [3] X. Zhang, J. Grajal, M. L'opez-Vallejo, E. McVay, and T. Palacios, "Opportunities and challenges of ambient radio frequency energy harvesting," *Joule*, vol. 4, no. 6, pp. 1148–1152, 2020.
- [4] Kalaagi, Mohammed, and Divitha Seetharamdo. "Enhancing the power level harvested by rectenna systems based on focusing metasurfaces for ambient environments." *Journal of Applied Physics* 132.22 (2022).
- [5] S. Dudoyer, V. Deniau, S. Ambellouis, M. Heddebaut, and A. Mariscotti, "Classification of transient em noises depending on their effect on the quality of gsm-r reception," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 55, no. 5, pp. 867–874, 2013.

Posters GT5

Evaluation rapide de l'exposition des personnes autour de systèmes de transfert d'énergie sans contact pour véhicule électrique par techniques de métamodélisation

P. Lagouanelle^{1,2}, L. Pichon¹, F. Freschi², L. Giaccone²

¹ : GeePs – Group of electrical engineering - Paris, UMR CNRS 8507, CentraleSupélec, Université Paris-Saclay,

Sorbonne Université, 3 & 11 rue Joliot-Curie, Plateau de Moulon 91192 Gif-sur-Yvette, France,

² : Dipartimento Energia “G. Ferraris”, Politecnico di Torino, 10129 Torino, Italy

Résumé

Le travail concerne l'évaluation des niveaux de champ rayonné dus aux systèmes de transfert d'énergie sans contact pour la recharge de batteries de véhicules électriques. L'exploitation de métamodèles (modèles de substitution) permet de minimiser le nombre de calculs de dosimétrie numérique dans les analyses de sensibilité impliquant différents paramètres d'entrée.

1. Introduction

Les systèmes de transfert d'énergie sans contact sont un facteur clé dans le développement de la mobilité électrique. Ces systèmes de forte puissance créent un champ magnétique élevé dans la zone environnante, qui peut excéder les limites des recommandations internationales en matière d'exposition des personnes. C'est pourquoi, lors de la conception de nouveaux systèmes, les niveaux de champ rayonné doivent être correctement évalués afin d'être conformes à la législation en vigueur. L'exploitation d'outils de simulation électromagnétique 3D pour l'étude de configurations réalistes atteint vite des limites rédhibitoires en termes de temps de calcul compte-tenu de la variabilité des paramètres en jeu. Dans ce contexte, le recours à des techniques de métamodélisation (modèles de substitution) [1-3] construits à partir d'un échantillon restreint de calculs 3D permet de réaliser à moindre coût une analyse de sensibilité ou une optimisation du système.

2. Description de la configuration d'exposition

Le système inductif étudié est celui du standard SAE J2954 (figure 1.) opérant à 85 kHz. L'analyse dosimétrique est réalisée lorsque le modèle anatomique est positionné dans le volume rectangulaire de la figure 2.

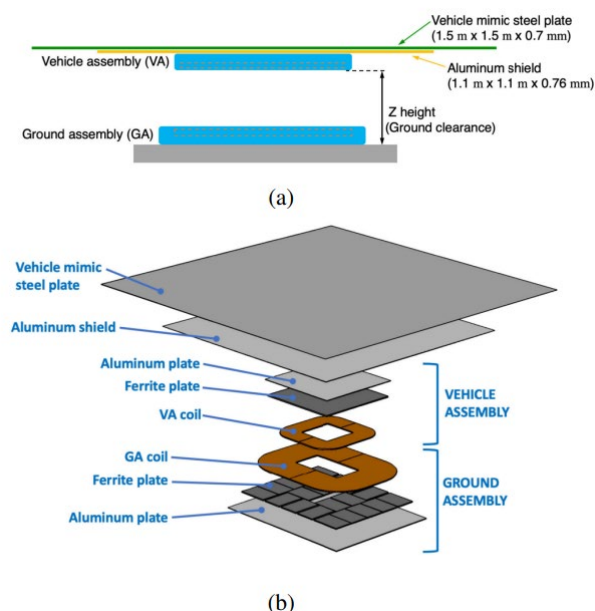


Figure 1. Plan de coupe (a) et vue 3D (b) du système

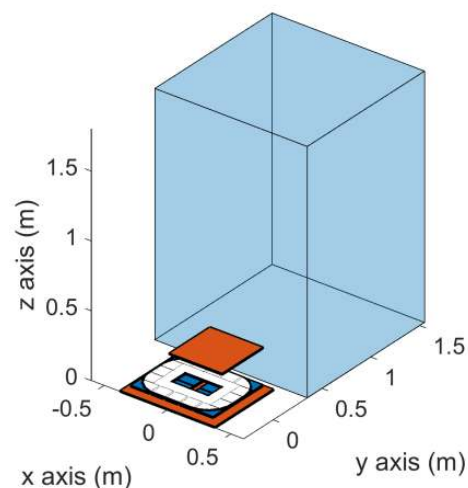


Figure 2. Volume de calcul

3. Résultats représentatifs

La figure 3 montre les différentes postures étudiées. Le modèle de corps humain est le « Duke model » issu de IT'IS Foundation exploitant la base de données [4]. Le calcul anatomique complet pour le champ électrique interne au corps humain est effectué à l'aide du logiciel Sim4life. En lien avec les valeurs issues de l'ICNIRP, un indice d'exposition maximal par tissu biologique est défini et l'application d'un algorithme d'échantillonnage adaptatif [1] permet de réaliser une étude de sensibilité selon la position du corps humain autour du système de système. Il est ensuite possible de prédire rapidement et à moindre coût le périmètre autour du système au sein duquel les champs seront en conformité avec les recommandations. En l'occurrence, dans la situation « pire-cas » (c), la zone est celle de la figure (4) qui ne comporte aucune valeur au-dessus du seuil recommandé.

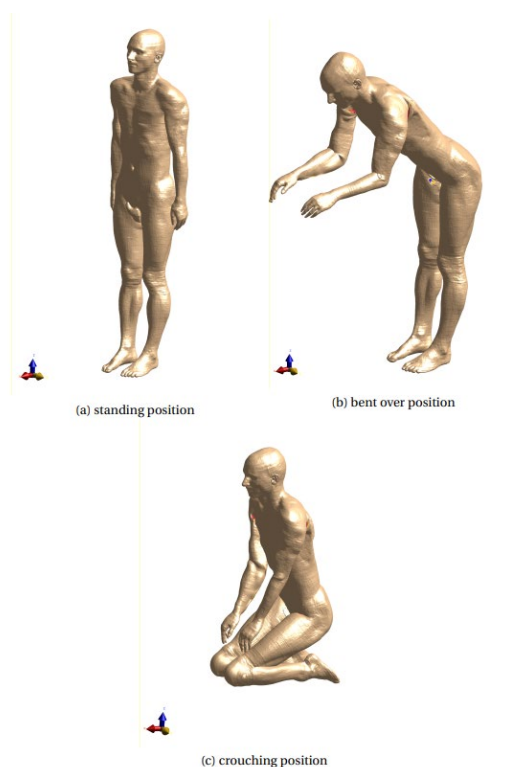


Figure 3. Positions anatomiques étudiées

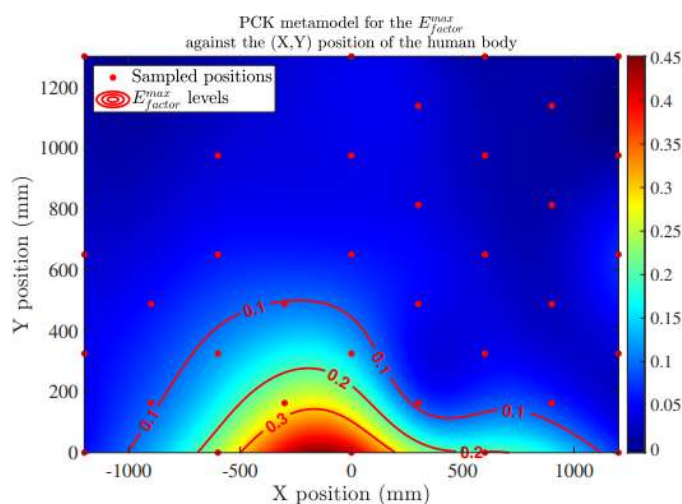


Figure 4. Périmètre de « sécurité » identifié

6. Bibliographie

- [1] P. Lagouanelle, F. Freschi, L. Pichon. Adaptive Sampling for Fast and Accurate Metamodel-Based Sensitivity Analysis of Complex Electromagnetic Problems. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2023.
- [2] P. Monferran, C. Guille-Escuret, C. Guiffaut and A. Reineix, "Prediction of Lightning Currents on Fastening Assemblies of an Aircraft Fuel Tank With Machine Learning Methods," in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 65, no. 3, pp. 812-822, June 2023.
- [3] A. Plot, P. Besnier and B. Goral, "Smart Input Space Sampling Combined with Kriging-Partial Least Square Regression for EMC Risk Analysis at PCB Level with Many Variables," 2023 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe, Krakow, Poland, 2023, pp. 1-6.
- [4] PA Hasgall et al. "IT'IS Database for thermal and electromagnetic parameters of biological tissues Version 4.1". In: (Feb. 2022)

Electromagnetic Compatibility (EmC) methodology to take into account the common mode interferences on EEAs ensuring critical functional safety levels

B. Hamard¹, M. Klingler¹, T. Dubois², G. Duchamp²

¹ : Stellantis Centre Technique de Velizy, F-78140 Velizy-Villacoublay, France,

² : 2Univ. Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, IMS, UMR 5218, F-33400 Talence, France
Baptiste.Hamard@stellantis.com

Résumé

Ce poster présente une méthodologie CEM pour prendre en compte les interférences électromagnétiques sur des architectures électriques/électroniques permettant d'en assurer le haut niveau de sûreté de fonctionnement. Cette méthodologie est découpée en trois parties : l'étude de l'environnement électromagnétique, l'estimation de la probabilité de défaillance d'un équipement due à une perturbation rayonnée et l'estimation de la probabilité de défaillance d'un équipement due à une perturbation conduite. Les travaux présentés dans cette contribution concernent principalement la modélisation de l'environnement électromagnétique et la probabilité de défaillance d'un équipement simplifié due à une perturbation électromagnétique rayonnée.

1. Introduction

Le développement des véhicules autonomes conduit à l'ajout de nouvelles fonctions le rendant capable de rouler sur route ouverte sans interaction du conducteur. Chacune de ces nouvelles fonctions ajoutées au véhicule nécessite un haut niveau de sûreté afin de ne pas aboutir à un grave accident en cas de défaillance ou de mauvais fonctionnement. La norme ISO 26262 [1] standardise les exigences en matière de sûreté automobile (SdF) des systèmes électriques/électroniques et/ou programmables sous forme de niveau d'intégrité (ASIL). Les architectures électriques/électroniques (AEE) sont composées de plusieurs équipements et de faisceaux qui les relient les uns aux autres. Les règles de la sûreté de fonctionnement conduisent à mettre en œuvre plusieurs AEE réalisant simultanément la même fonction [1]. Pour ces AEE réalisant des fonctions à haut niveau de sûreté de fonctionnement, démontrer leur conformité à toutes les normes d'essai d'immunité électromagnétique n'est donc pas suffisant pour garantir leur fonctionnement. Pour garantir l'application de la sûreté dans la CEM conformément à [2], il est nécessaire de minimiser et donc d'évaluer la probabilité de défaillance simultanée, d'un point de vue CEM, de deux équipements assurant la même fonction [3-6].

Ce poster synthétise mes travaux de thèse en présentant une méthodologie consistant à étudier la probabilité de défaillance d'un équipement dû à une perturbation électromagnétique. Cette méthodologie est découpée en trois parties : l'étude de l'environnement électromagnétique, l'estimation de la probabilité de défaillance d'un équipement due à une perturbation rayonnée et l'estimation de la probabilité de défaillance d'un équipement due à une perturbation conduite.

2. Description des travaux

Dans le cadre de cette étude, pour des raisons de simplification, l'environnement électromagnétique considéré est une caisse semi fermée faisant globalement $\frac{1}{4}$ de véhicule illuminé par une onde plane. De même, l'équipement électronique à l'intérieur de la caisse est assimilé à une antenne dipolaire. L'objectif est de déterminer de manière statistique la probabilité de défaillances de cet équipement due à une perturbation électromagnétique rayonnée.

2. Modélisation de la probabilité de défaillances d'un équipement simplifié

Plusieurs approches ont été envisagées [7,8], le poster présente une approche statistique, en déterminant la probabilité de défaillance à partir d'un critère de défaut : la tension induite par le champ sur l'antenne

dipolaire. La figure 1 présente par exemple la probabilité de défaillances d'un équipement due à une perturbation électromagnétique.

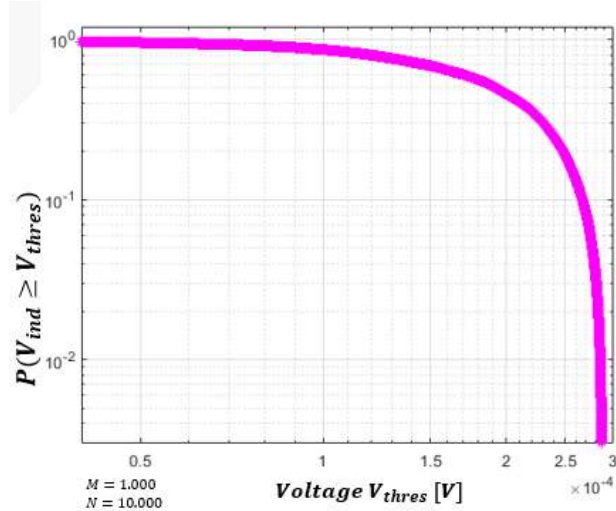


Figure 1. Probabilité de défaillances d'un équipement due à une perturbation électromagnétique.

4. Conclusion

Dans cette contribution, nous avons montré l'intérêt de développer une méthodologie afin de déterminer la probabilité de défaillances due à une perturbation électromagnétique d'un équipement d'une architecture électrique et électronique. Les perspectives de l'étude concernent notamment l'estimation et la prise en compte de la probabilité de défaillances d'un équipement due à une perturbation conduite.

5. Remerciements

Ces travaux sont réalisés dans le cadre de l'OpenLab « Electronics & System for Automotive » entre le laboratoire IMS et le groupe Stellantis.

6. Bibliographie

- [1] V. Brindejone, « Notions de sûreté de fonctionnement pour la CEM », Techniques de l'ingénieur, 2017.
- [2] ISO 26262 - Road vehicles - Functional safety (All documents), 2011.
- [3] IEC 61508 Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems, 2010.
- [4] IEEE Standard for Techniques and Measurement to Manage Functional Safety and Other Risks with Regards to Electromagnetic Disturbances, 2021.
- [5] K. Armstrong, « Reducing Functional Safety and Other Risks Due to EM Disturbances: IEEE Standard 1848 », 2018.
- [6] K. Armstrong, « Review of Progress with EMC-Related Functional Safety », 2003.
- [7] Hamard Baptiste *et al*, « Détermination de la probabilité de dépassement d'un niveau de tension induite sur un dipôle dans une cavité automobile », CEM France, 2023.
- [8] Hamard Baptiste *et al*, « A first simplified approach to estimate the probability of an induced voltage on a component in a vehicle », EMC Europe, 2023.

Mise en évidence de défaillances rapides et tardives en VIRC à l'aide d'un équipement de test générique approprié

Q. Jacquet¹, G. Andrieu¹, Y. Rammal¹

Laboratoire Xlim, UMR 7252, Université de Limoges, France

quentin.jacquet@xlim.fr

Résumé

Cette étude présente la structure d'un équipement générique spécialement créé afin de prouver la capacité d'une VIRC (Vibrating Intrinsic Reverberation Chamber) à mettre en évidence des défaillances rapides et tardives d'un dispositif sous test (DUT) lors de tests en susceptibilité rayonnée.

1. Introduction

Les chambres réverbérantes sont utilisés pour générer des champs électromagnétiques à l'aide d'un brassage de mode. Celui-ci peut-être discret dans le cas d'une position fixe du brasseur de modes ou continu comme c'est le cas pour les VIRC. L'objectif de cette étude est de déterminer s'il est possible de mettre en évidence des défaillances dans un environnement électromagnétique en constante évolution [1] comme c'est le cas dans une VIRC, aussi efficacement qu'en CRBM, notamment en ce qui concerne les défaillances tardives se produisant après quelques secondes d'exposition.

2. Dispositif sous test (DUT)

Le dispositif sous test que nous avons conçu doit pouvoir mettre en évidence aussi bien les défaillances rapides que les défaillances tardives. Pour cela l'architecture du DUT [2], présentée sur la Fig.1, se divise en deux étages.

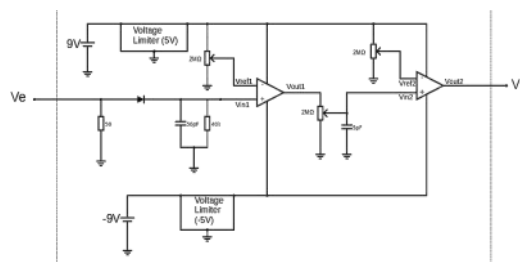


Figure 1. Architecture du DUT

Le premier étage permet de révéler les défaillances immédiates lorsque le niveau de perturbation collecté dépasse la tension de seuil d'un montage de type comparateur. Un deuxième étage se comportant comme un intégrateur permet ensuite de tester le cas de défaillances tardives.

Le poster montrera qu'il est non seulement possible de mettre en évidence les défaillances rapides et tardives en VIRC mais également que les temps de mesures sont largement réduits en VIRC.

3. Bibliographie

- [1] G. Andrieu, Y. Rammal, N. Ticaud, N. Roger, A. Laisné and P. Pouliguen, "On the Cancellation of Unstirred Paths in a Fully Stirred VIRC Working as a Perfect Chaotic Reverberation Chamber," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation
- [2] G. Andrieu, "Risk to Declare EMC Compliant a Faulty EUT During Radiated Susceptibility Tests Performed in an Undermoded Reverberation Chamber," in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 63, no. 2, pp. 365-374, April 2021

Filtres actifs pour la réduction des émissions conduites des convertisseurs de puissance

Richard Perraud¹, Davin Guédon¹, Sébastien Serpaud²

¹ Airbus SAS, Electrification Technologies

² IRT Saint Exupéry

richard.perraud@airbus.com

Résumé

L'électrification des plateformes automobiles et aéronautiques n'est possible qu'avec l'intégration de convertisseurs de puissance, dont le principe de fonctionnement est synonyme de génération de pollution électromagnétique, et notamment d'émissions conduites. Les émissions électromagnétiques conduites peuvent être contrôlées par des filtres passifs lourds et encombrants, et la tendance ne fait que s'accroître avec la montée en tension. Depuis peu, les filtres actifs analogiques et numériques ont montré leur efficacité et leur intérêt pour réduire le poids et le volume des filtres passifs. Les résultats présentés dans ce papier concernent l'utilisation de filtres actifs numériques pour la réduction des courants de mode commun sur un convertisseur aéronautique 10 kW.

1. Introduction

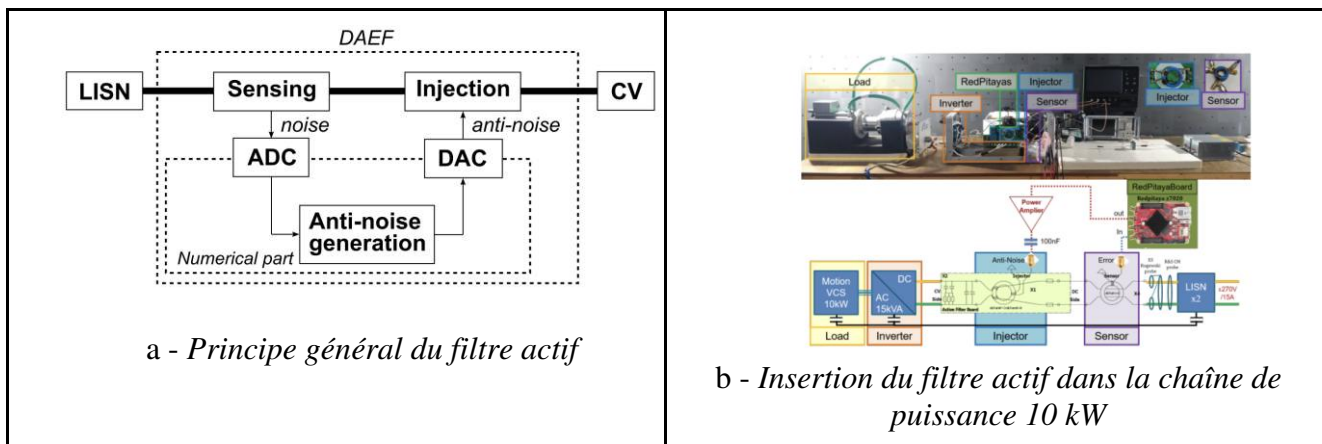
Les objectifs de réduction des émissions de CO₂ contraignent les secteurs de l'industrie des transports à proposer des solutions soutenables grâce au développement de technologies permettant l'électrification de leurs véhicules. Dans le secteur aéronautique, des avions à propulsion électrique auraient bien sûr un impact considérable sur l'environnement mais aussi sur les coûts de maintenance, la pollution sonore et la sécurité. Quelque soit la source d'énergie primaire, batteries ou piles à combustibles, les onduleurs seront l'organe critique alimentant des machines électriques embarquant des technologies avec une grande efficacité énergétique tout en assurant des émissions électromagnétiques compatibles de l'environnement dans lequel les convertisseurs seront installés. La commutation des tensions du bus DC se traduit par des dv/dt qui produisent des courants de mode commun très importants pouvant dépasser de plus de 60 dB les limites d'émissions conduites actuelles. Afin de limiter ces émissions des filtres passifs avec de forte inductance de mode commun sont classiquement utilisés mais ils représentent plus de 30% du poids et du volume du convertisseur. L'utilisation de composants actifs analogiques ou numériques commence à montrer des performances et une intégration intéressante dans plusieurs types d'applications et permettent de diminuer la taille et le poids des filtres passifs [1]. Les travaux présentés dans ce papier concernent l'utilisation de filtres actifs numériques et leur application sur une chaîne de conversion 10 kW.

2. Configuration de test pour le filtre actif

Le filtre actif est inséré entre le convertisseur et le bus continu, cf Fig. 1a, l'objectif étant de filtrer les émissions conduites de mode commun côté DC. Le filtre actif se compose ici d'un dispositif de mesure du bruit (courant), d'un dispositif de traitement numérique du bruit et d'un dispositif d'injection. Les difficultés à surmonter sont la mesure et l'injection large bande, l'acquisition rapide des convertisseurs ADC et DAC, le choix d'un algorithme efficace et le choix d'une plateforme numérique (FPGA) performante [2]. Le dispositif est inséré dans la chaîne 10 kW tel que présenté dans Fig1. b.

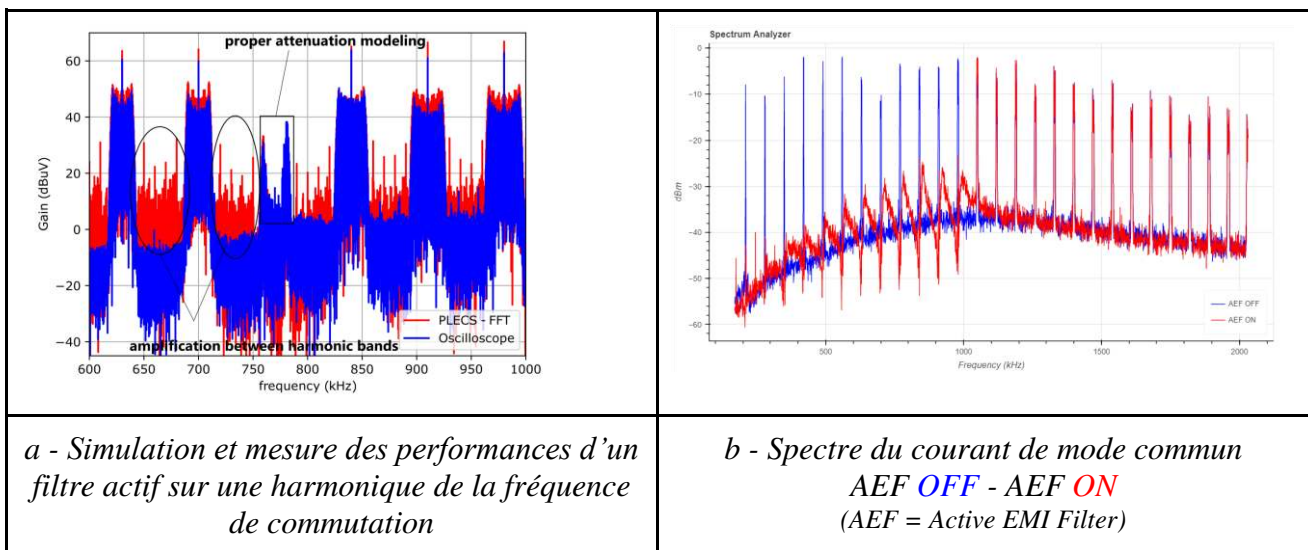
3. Résultats

Des étapes successives de mesure et de simulation ont été nécessaires pour ajuster les paramètres des filtres actifs, mettre en place les dispositifs de mesure et d'injection sur des maquettes puis sur le banc de test complet.



Figures 1 - a) Filtre actif (principe) et b) insertion dans le chaîne 10 kW

Le premier résultat, cf Fig. 2a, est obtenu sur un setup simple avec émulation d'une source de bruit PWM en mode commun et la mise en place d'un filtre numérique de type *notch filter* [1]. La simulation circuit PLECS permet de bien mettre en évidence le fonctionnement de l'algorithme LMS sur un harmonique de la fréquence de commutation. A droite, nous pouvons observer l'efficacité du filtre actif (jusqu'à 40 dB d'atténuation) sur les émissions de mode commun mesurées sur la chaîne 10 kW de l'IRT.



4. Conclusion

Dans cette contribution, nous illustrons l'intérêt des filtres actifs numériques de type notch filter appliqués sur une chaîne de puissance 10 kW. Les perspectives sont l'extension des performances en fréquence et la quantification des gains en poids et en volume par rapport à une solution passive de référence pour une application de plus forte puissance. Elles feront l'objet de travaux dans le futur projet de recherche RePowerDrive lancé 2024 à l'IRT.

5. Remerciements

Les auteurs remercient TU Dortmund pour la collaboration de recherche sur les algorithmes LMS et la mise en place des filtres sur FPGA.

6. Bibliographie

- [1] A. Bendicks and Al., “Active EMI Reduction of Stationary Clocked Systems by Adapted Harmonics Cancellation”, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol.61, n°4, pp. 998-006, 2019.
- [2] S. Serpaud and Al., Optimization of sensing and injecting units for a common-mode active EMI filter, EMC Europe 2023, Sept. 2023

Étude du comportement d'une chaîne de mesure de température face à des impulsions électromagnétiques intentionnelles

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, 4 Avenue des Louvresses 92230 Gennevilliers
antoine.duguet@thalesgroup.com

Résumé

Nous nous intéressons, ici, à l'étude du comportement d'une chaîne de mesure de température analogique, intégrée à un système pour l'Internet des Objets, soumise à des interférences électromagnétiques intentionnelles conduites. Le signal d'agression considéré est un train d'impulsions modulées autour d'une porteuse. Le signal de mesure est la tension de sortie du capteur, présent dans la chaîne, qui représente une image de la température à mesurer. Lors des injections du signal agresseur, des variations de la tension de sortie du capteur sont observées. L'analyse de ces variations montrent des transitoires « lents » sur les fronts du signal d'interférence. Nous y observons également un phénomène de cumulation entre les impulsions.

1. Introduction

L'Internet des Objets est une thématique visant à faciliter l'interopérabilité d'objets électroniques en les connectant au réseau Internet. Le nombre d'objets connectés sur le réseau est en croissance depuis quelques années et continuera d'augmenter dans les années à venir d'après [1]. Ceci favorise leur utilisation dans de plus en plus d'applications critiques. Or, les objets développés selon cette philosophie sont principalement composés de COTS (*Commercial Off-The-Shelf*) qui ne présentent aucun durcissement physique, pour le moment du moins.

Parmi toutes les sources d'interférences électromagnétiques, nous nous intéressons ici à celles à caractère intentionnel et offensif. De part la grande diversité des formes d'onde employées dans ce type d'attaque [2]–[5], il est difficile de définir un cadre de test de la susceptibilité électromagnétique des dispositifs face à des attaques intentionnelles. C'est pourquoi l'objectif global de cette étude est de mettre en œuvre une méthodologie de test de la susceptibilité des dispositifs électroniques face aux attaques électromagnétiques. L'analyse des phénomènes de perturbation observés devrait de plus permettre la proposition de règles de durcissement des systèmes électroniques de type IoT.

2. Méthodologie adoptée

Dans le cadre de cette étude, le système présenté en Figure 1 a été développé. L'objectif de ce démonstrateur est de permettre l'assemblage d'un large choix de références de cartes de développement pour microcontrôleur, de modules de capteurs, d'actionneurs et de modules de communication numérique dédiés au grand public.

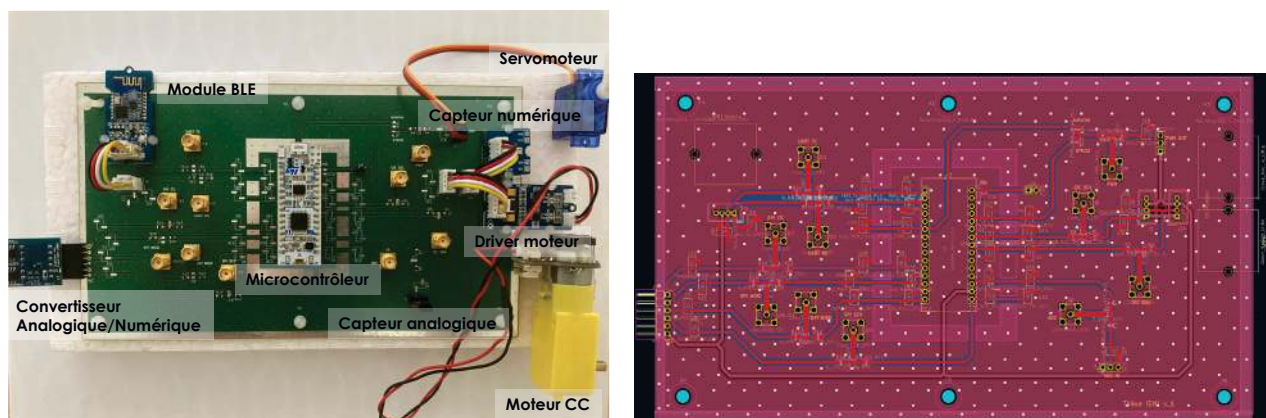


Figure 1 : Démonstrateur développé pour l'étude (gauche). Routage du circuit imprimé (droite)

L'objectif de cette contribution est de mettre en avant le comportement d'une chaîne de mesure de température analogique soumise à des signaux d'interférence de type impulsionnel modulé. Le signal considéré est donc un train d'impulsions modulées autour d'une porteuse (600 MHz – 6 GHz). Ces signaux sont injectés à la cible en mode conduit par le biais d'une méthode proche de la DPI (*Direct Power Injection*).

3. Résultats d'injection sur le capteur

Dans cette partie, nous nous intéressons au comportement de la sortie du capteur, mesurée au voltmètre, lorsque celle-ci est soumise au signal considéré. Les résultats présentés sur la Figure 2 nous montrent que la tension de sortie du capteur présente des variations lors de l'application du signal d'interférence. De plus, la sortie du capteur présente des phénomènes transitoires au moment des fronts, montant et descendant, du signal d'interférence. Enfin, nous constatons que le capteur ne parvient pas à atteindre une tension de fonctionnement nominale entre les impulsions. Nous avons donc un phénomène de cumulation qui apparaît.

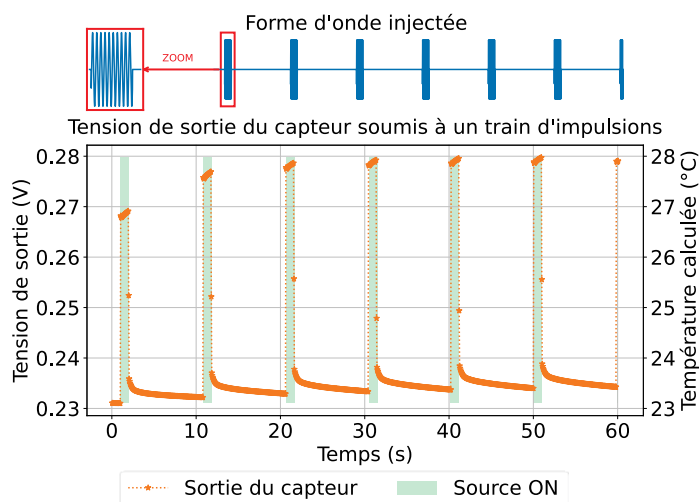


Figure 2 : Tension de sortie du capteur soumis à un train d'impulsions de largeur 1 seconde en fonction du temps

4. Conclusion

L'objectif global de l'étude est de mettre en œuvre une méthodologie d'évaluation de la susceptibilité électromagnétique des objets connectés face à des interférences électromagnétiques intentionnelles. Nous avons développé un objet connecté type que nous avons présentés dans cette contribution. Nous avons soumis un capteur de température analogique à un train d'impulsions modulées autour d'une porteuse. Nous avons pu voir qu'il est possible de modifier la température mesurée par le système par injection de ces interférences.

5. Bibliographie

- [1] M. Hasan, « Number of connected IoT devices ». <https://iot-analytics.com/number-connected-iot-devices/>
- [2] I. Giechaskiel et K. Rasmussen, « Taxonomy and Challenges of Out-of-Band Signal Injection Attacks and Defenses », *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, vol. 22, n° 1, p. 645-670, 2020.
- [3] J. L. Esteves, « Electromagnetic Watermarking: exploiting IEMI effects for forensic tracking of UAVs », in *2019 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE*, Barcelona, Spain: IEEE, sept. 2019, p. 1144-1149.
- [4] L. C. Lavau, M. Suhrke, et P. Knott, « Impact of IEMI pulses on a barometric sensor », in *2022 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe*, Gothenburg, Sweden: IEEE, sept. 2022, p. 290-294.
- [5] A. Z. Mohammed, A. Singh, G. Y. Dayanikli, R. Gerdes, M. Mina, et M. Li, « Towards Wireless Spiking of Smart Locks », in *2022 IEEE Security and Privacy Workshops (SPW)*, San Francisco, CA, USA: IEEE, mai 2022, p. 251-257.

Nouvelle méthodologie d'optimisation de conception de cartes aéronautiques intégrant des liens haute vitesse jusqu'à 40 Gbps : compromis entre performance et coût

Soazig LE BIHAN, Adil EL ABBAZI, Jean-Baptiste BEGUERET, Tristan DUBOIS, Marc GATTI
1st THALES AVIONICS, soazig.le-bihan@thalesgroup.com;
2nd THALES AVIONICS, adil.elabbazi@fr.thalesgroup.com;
3rd IMS, jb.begueret@ims-bordeaux.fr;
4th IMS, tristan.dubois@u-bordeaux.fr;
5th THALES AVIONICS, marc-j.gatti@fr.thalesgroup.com

Résumé : Pour garantir la performance et la fiabilité des designs aéronautiques, il est nécessaire de modéliser leur comportement et de simuler leurs performances pour des conditions environnementales avioniques sévères. A mesure que les composants électroniques deviennent plus complexes et opèrent à des fréquences plus élevées, la modélisation, la simulation et la mesure nécessitent une méthodologie analytique innovante et robuste. Elle doit combiner une conception minutieuse, des tests et des analyses, ainsi qu'une recherche et des développements continus de techniques avancées.

1. Introduction

Les évolutions des technologies de circuits imprimés ont progressé au fil des ans, permettant une densité de circuits plus importante et des gravures plus fines. Cette avancée a également conduit à des débits de données plus élevés, des vitesses d'horloge accrues, des temps de commutation réduits et une consommation d'énergie moindre, le tout dans des espaces de plus en plus restreints. L'intégrité du signal (IS) est un aspect crucial dans la conception des cartes électroniques, car plusieurs facteurs peuvent influencer la qualité du signal, notamment l'atténuation du signal, l'adaptation d'impédance, la diaphonie et le jitter. L'atténuation du signal est due aux pertes diélectriques et conductrices, qui doivent être soigneusement prises en compte dans l'analyse de l'intégrité du signal.

Par conséquent, une méthodologie plus précise est nécessaire pour modéliser ces effets en simulation, en tenant compte de la structure réelle de la carte de circuit imprimé (PCB), de ses propriétés anisotropes et de ses caractéristiques dépendantes de la fréquence. L'analyse de l'IS ne doit plus considérer le diélectrique comme homogène et le cuivre comme une surface plane. De plus, l'analyse et l'optimisation de chaque discontinuité potentielle sont devenues une partie essentielle de l'analyse de l'IS, car elles peuvent entraîner des pertes par réflexion et insertion le long de la piste. Plusieurs cartes sont actuellement en développement pour des projets aéronautiques militaires et civils, intégrant des liaisons haute vitesse (DDR et Serdes avec Ethernet) jusqu'à 40 Gbps avec des densités très élevées, tout en opérant dans des conditions environnementales sévères (CEM, thermiques, vibrations...).

2. Rugosité

En fonction de la classe du profil de rugosité, la surface de cuivre peut entraîner des pertes plus élevées en haute fréquence à cause de l'effet de peau. À mesure que la fréquence augmente, l'effet de peau et la rugosité seront plus significatifs, augmentant la résistance série et les pertes le long du conducteur. Ces pertes seront plus importantes si la piste est longue et étroite.

Jusqu'à 10 GHz, l'effet de la rugosité avait très peu d'impact sur les pertes en transmission. Avec l'augmentation des débits de données, il est devenu essentiel de prendre en compte son effet afin de mieux caractériser les performances du circuit. La rugosité introduit des imprécisions dans les valeurs de pertes, de constantes diélectrique et de délais de phase [1].

La question principale à aborder est comment modéliser avec précision la rugosité du cuivre en simulation. Le scénario idéal serait d'utiliser des profilomètres ou des techniques de microscopie haute résolution pour obtenir une représentation précise du cuivre et de sa rugosité. Néanmoins, ces méthodes sont longues et coûteuses. Pour résoudre ce problème, des expressions mathématiques ont été développées. Certaines s'appuient uniquement sur les données limitées fournies par le fabricant et sont capables de calculer un facteur de correction de la rugosité [2].

Il est important de déterminer la plage de fréquences pour laquelle ces modèles sont réalistes. De plus, il est nécessaire de déterminer quels modèles conviennent aux débits de données de 40 Gbps et plus.

3. Choix du diélectrique

Une carte de circuit imprimé est constituée de couches isolantes et conductrices. Les pertes sont principalement dominées par le diélectrique en haute fréquence, ce qui confère une importance accrue au choix des marges de conception par rapport aux propriétés des matériaux pour les designs haute vitesse.

Le choix de l'empilement des couches et plus spécifiquement, le type de verre utilisé, devient crucial pour la robustesse et la fiabilité des signaux haute vitesse. Un matériau diélectrique doit répondre aux contraintes thermiques, mécaniques et électriques de l'aéronautique. Le matériau diélectrique le plus couramment utilisé dans les circuits imprimés est constitué de fibres de verre tissées et encapsulées dans de la résine. Les propriétés électriques du diélectrique D_k et D_f dépendent du rapport de ces deux matériaux.

L'hétérogénéité du matériau peut entraîner des disparités dans les vitesses de propagation au sein de la paire différentielle. Cet effet, appelé "déphasage dû au tissage de verre", peut générer des conversions de mode, un déphasage (Figure 1), des résonances et des pertes dues à des désadaptations d'impédance le long de la piste [3]. Cela peut conduire à des erreurs potentielles de bits, à une fermeture du diagramme de l'œil et contribuer à la génération de jitter déterministe.

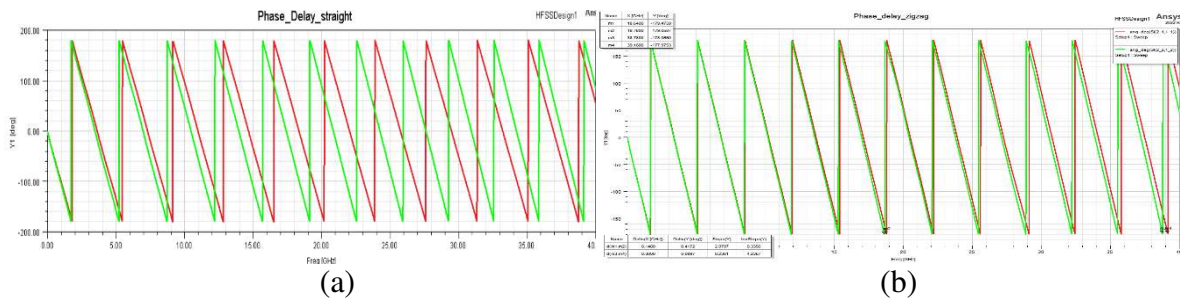


Figure 1 Comparaison du retard de phase entre le routage droit (a) et le routage en zigzag (b) sous HFSS

4. Egalisation et optimisation

Les signaux haute vitesse sont très sensibles à la moindre discontinuité : vias, capacité de blocage DC, routage sous les billes BGA, connecteurs, etc. La modélisation précise et l'optimisation de chacune d'entre elles dans les simulations sont essentielles pour obtenir des résultats fiables (Figure 2).

À mesure que l'optimisation du PCB atteint ses limites physiques, des techniques d'égalisation [4] sont mises en œuvre au sein du transceiver pour compenser d'éventuelles pertes, du jitter, des réflexions dues à une mauvaise adaptation d'impédance, etc. Trouver les paramètres optimaux d'égalisation dans les simulations peut être une tâche complexe et chronophage. Des outils sont disponibles pour aider à les identifier en fonction des normes de chaque standard, et devront être utilisés pour automatiser et minimiser le temps de design des futurs produits aéronautiques.



Figure 2 Optimisation des discontinuités d'impédance pour les liens haute vitesse sous HFSS 3D Layout

5. Conclusion

Répondre à ces défis nécessite une méthodologie analytique innovante et robuste, combinant une conception soignée, des tests et des analyses, ainsi qu'une recherche et un développement continus de techniques avancées. Chaque sujet couvrira les liaisons DDR et Serdes jusqu'à 40 Gbit/s et plus, y compris un benchmark des outils fournis par les éditeurs de logiciels. Les modèles existants seront comparés aux nouveaux et corrélés aux mesures. Ce travail vise à économiser du temps et des ressources pour les futures études sur les liaisons à haut débit tout en améliorant la fiabilité des produits, en réduisant les coûts et en accélérant la mise sur le marché.

6. Bibliographie

- [1] E. Bogatin, "The Quest for Smoother Copper May Have Reached Its Limit", Signal Integrity Journal, Feb 2020
- [2] B. Simonovich, "Practical_Modeling of High speed_Channels_Based_on_Data_Sheet_Input", Lamsim Entreprises, EDI CON, 2017

[3] B. Hargin , “Preventing glass-weave skew”, Siemens

[4] C. Filip, “Overview of Channel Equalization Techniques for Serial Interfaces”, Siemens

Modèle d'estimation de la susceptibilité conduite à partir d'une injection champ proche entre 500 MHz et 2 GHz

N. Castagnet^{1,2}, F. Escudié¹, A. Boyer²

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

² : LAAS-CNRS, Toulouse, France
nicolas.castagnet@cea.fr

Résumé

Ce papier propose une méthodologie permettant de corréliser une mesure d'immunité en champ proche (NFSI) avec un test en injection conduite entre 500 MHz et 2 GHz. Une validation expérimentale est effectuée sur des charges passives.

1. Introduction

L'utilisation de composants électroniques compactes et complexes est de plus en plus présente dans les systèmes électroniques modernes. La méthode d'injection conduite (DPI) [1] est souvent employée pour analyser le comportement des composants soumis à une agression électromagnétique intentionnelle. Cependant, elle est fortement intrusive et ne prend pas en considération l'environnement électromagnétique réel dans lequel le composant fonctionne. De plus, l'impédance de sortie du générateur RF peut avoir une influence sur le fonctionnement du dispositif sous test (DST). À l'inverse, le NFSI offre une alternative non intrusive [2] mais l'agression injectée au DST s'effectue sans contact avec celui-ci donc le couplage de la perturbation est différent de celui apparaissant dans le cas d'une injection conduite. Le lien entre les seuils de défaillance mesurés en DPI et en NFSI n'est pas évident et n'a pas d'antécédents dans la littérature. Cet article propose un modèle permettant d'estimer le résultat d'une injection conduite à partir du NFSI. La méthodologie est validée sur des cas simples, pour une fréquence comprise entre 500 MHz et 2 GHz.

2. Modélisation de la chaîne d'injection RF

On suppose qu'une défaillance apparaît au niveau du DST à une fréquence donnée pour une certaine tension V_{DST} appliquée sur une broche du composant, représenté par son impédance Z_{DST} . Son comportement est supposée quasi linéaire donc l'impédance reste constante en fonction de l'amplitude de la perturbation appliquée. Sur la figure 1, une onde a_1 est injectée via un générateur (V_G , Z_G) et une ligne d'impédance Z_C dans un quadripôle de paramètres [S] qui modélise la chaîne d'agression.

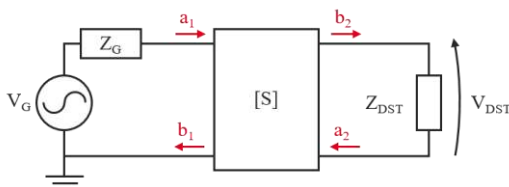


Figure 1. Schéma de la chaîne d'agression représenté avec une boîte de paramètres S.

$$V_{DST} = \frac{V_G}{2} \cdot S_{21} (1 + \Gamma_{DST}) \quad (1)$$

$$V_G^{NFSI} = V_G^{DPI} \cdot \frac{S_{21}^{DPI}}{S_{21}^{NFSI}} \quad (2)$$

On suppose que le générateur est adapté ($Z_G = Z_C$). Dans le cas d'une injection conduite comme la DPI, $S_{11} = S_{22} = 0$ mais cette hypothèse n'est juste en NFSI que si la ligne microruban sur laquelle se couple la sonde d'injection champ proche est adaptée 50Ω . On peut alors écrire l'équation (1). Si un défaut intervient pour une tension V_{DST}^{DPI} lors de l'injection d'une agression en mode conduit, celui-ci apparaît aussi lorsque la même tension est transmise au composant avec une sonde d'injection champ proche. La relation qui permet de déterminer l'amplitude V_G^{NFSI} du générateur RF en NFSI afin d'induire des effets identiques est $V_{DST}^{DPI} = V_{DST}^{NFSI}$ est alors donnée par (2). Cette équation va permettre d'extrapoler le résultat d'un test conduit

à partir du NFSI.

3. Validation expérimentale sur des charges passives et deux types de couplage champ proche

Les paramètres [S] des composants des deux chaînes d'agression (DPI et NFSI) sont caractérisés à l'aide d'un PNA-X pour extraire les fonctions S_{21}^{DPI} et S_{21}^{NFSI} . Deux sondes sont utilisées pour valider le modèle avec différents types de couplage (magnétique et électrique). Une étape de calibration [3] permet de définir les fonctions K_H et K_E , correspondant respectivement à la correction à apporter en champ proche lors de l'utilisation d'une sonde magnétique ou électrique. D'après (2), $K_H = S_{21}^{DPI}/S_{21}^{NFSI}|_H$ et $K_E = S_{21}^{DPI}/S_{21}^{NFSI}|_E$.

La figure 2 est une synthèse des fonctions calculées ci-dessus.

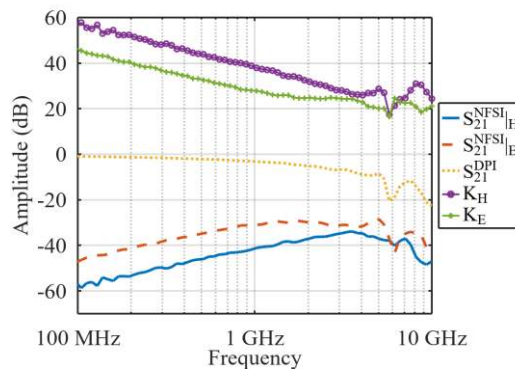


Figure 2. Fonctions de transfert S_{21} des techniques d'injections comparées (DPI et NFSI) pour différentes sondes (couplage magnétique H ou électrique E).

La validation expérimentale est menée entre 500 MHz et 2 GHz en raison du faible couplage des sondes d'injection en basse fréquence et de la bande passante limitée des instruments de mesure. L'amplitude V_G^{DPI} du générateur RF lors d'une agression en mode conduit est constante et la décroissance de la fonction de transfert S_{21}^{DPI} en DPI provient des pertes liées au coupleur utilisé. À l'inverse et comme le rappelle (2), la tension du générateur RF pour un test NFSI varie en fonction de la fréquence et du type de couplage pour induire le même niveau de tension au DST. La figure 3 montre les tensions mesurées aux bornes de composants de différentes impédances (réelles et complexes) : deux résistances (20 Ω et 1 k Ω) et un condensateur de 10 μ F.

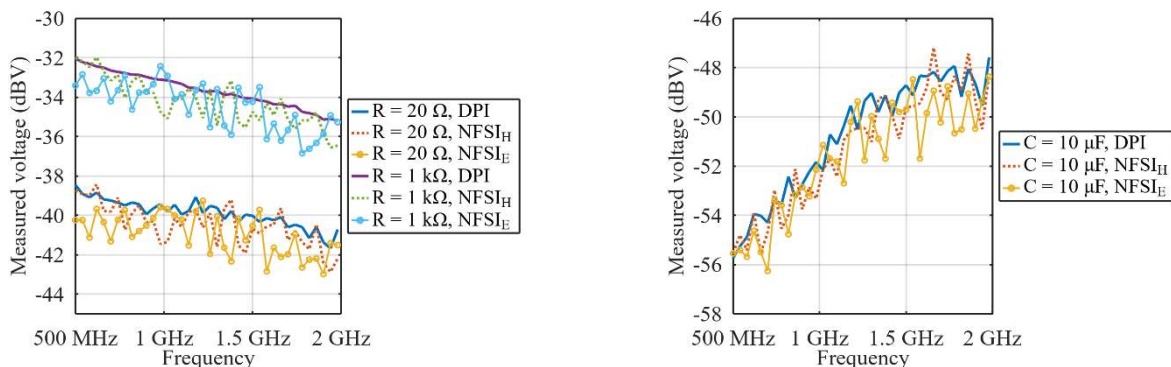


Figure 3. Tensions aux bornes de plusieurs composants pour différentes techniques d'injection (DPI, NFSI sonde magnétique et électrique).

Ces deux études de cas simples permettent de valider le modèle de corrélation champ proche et injection conduite pour un couplage magnétique et électrique sur des composants passifs linéaires. La même expérimentation a été effectuée sur d'autres valeurs de composants apportant une validation supplémentaire.

4. Conclusion

L'injection en champ proche est une technique prometteuse d'analyse de la susceptibilité EM d'un composant électronique de manière non intrusive. Cet article a proposé un modèle permettant d'estimer le résultat d'une injection conduite à partir du NFSI. Les fondements théoriques ont été validés sur des charges linéaires passives pour un couplage magnétique puis électrique. Par la suite, cette méthodologie sera éprouvée sur des composants non linéaires, des CI et des composants dont l'impédance est inconnue puis transposée dans des bandes de fréquences plus élevées.

5. Remerciements

Ces travaux sont soutenus financièrement par le Ministère des Armées – Agence de l'innovation de défense.

6. Bibliographie

- [1] IEC 62132-4, Integrated circuits – Measurement of electromagnetic immunity – Part 9: Measurement of electromagnetic immunity 150 kHz to 1 GHz - Part 4: Direct RF power injection method, International Electrotechnical Commission, 2014.
- [2] IEC TS 62132-9, Integrated circuits – Measurement of electromagnetic immunity – Part 9: Measurement of radiated immunity – Surface scan method, International Electrotechnical Commission, 2014.
- [3] A. Boyer, S. Bendhia, E. Sicard, “Modelling of a Mixed-Signal Processor Susceptibility to Near-Field Aggression”, IEEE Symposium on EMC, Hawaii, 2007.

Investigations on Conducted Emissions due to a Bidirectional On-board Charger: Impact of the Grid Configuration

M. SEDDIGHI¹, F. COSTA^{1,2}, P.E. LÉVY¹

¹ : Paris-Saclay University, ENS Paris-Saclay, CNRS, SATIE, 91190 Gif-sur-Yvette, France.

² : Paris-Est Créteil University, 94000 Créteil, France.

mohsen.seddighi@ens-paris-saclay.fr

Abstract

This paper investigates conducted emissions generated by a bidirectional On-board Charger (OBC) with a particular focus on the grounding systems. To accomplish this, a configurable system, including an autotransformer and an isolating transformer, is utilized, which enables us to change the grounding system, and an 11 kW OBC prototype is employed to charge/discharge the battery. In order to examine the variations in interferences with respect to the grid parameters, conducted emissions are measured without inserting the LISN. Furthermore, a black box model is presented to characterize the converters' high-frequency (HF) behavior as the source of perturbations. The other elements of the system, including the transformers and cables, are also modeled and added to the HF model, enabling a comprehensive representation of the entire system. This final HF model facilitates the estimation of conducted emissions levels throughout the system. The validity of the developed model is verified through empirical measurements.

1. Introduction

The OBC is considered the heart of the AC charging system in EVs, and by high switching frequency power conversion, it ensures proper battery charging conditions. OBCs have been revolutionized by the emergence of Wide-Band Gap (WBG) components, such as silicon carbide (SiC) and gallium nitride (GaN). These components offer significant benefits in terms of efficiency and power density by the ability to switch at even higher frequencies. However, these benefits come at a cost; as the switching frequency increase, the rate of voltage and current change (dv/dt and di/dt), which are the primary sources of electromagnetic interference (EMI), increase as well [1]. Consequently, the EMC filters become an inevitable part of the charging system and are mainly responsible for the volume and weight of the OBC, therefore limiting the autonomy of EVs. As EVs become more dominant and integrated within the power grid, they will interact with various electrical and electronic devices in the surrounding environment. Without implementing effective EMC measures, the integration of fleets of EVs into the grid cannot be achieved seamlessly, as they will disturb the grid ecosystem.

In compliance with EMC standards such as CISPR-25, conducted emission measurements require a line impedance stabilization network (LISN). This device is placed after the power supply to eliminate the high-frequency tie between the Equipment Under Test (EUT) and the power supply. The LISN also provides a consistent impedance that mitigates the variations in line impedance across different locations, so all the manufacturers are in the same experimental conditions [1]. The design of the LISN ensures that its impedance statistically represents the mains' impedance. However, the disparity between the source or grid impedance and the LISN impedance can potentially impact the accuracy of conducted emission measurements [2]. In the absence of LISN, one grid parameter that can affect the level of conducted emissions is the grounding or earthing system. Various grounding systems, presented in Fig. 1, are used depending on the necessities and local standards. For example, in France, the IT system is mandatory in hospitals and operating theaters, and the TN-C is forbidden in buildings with a risk of explosion. Although all Earthing Systems offer users the exact extent of safety, they have different operating traits regarding EMC [3].

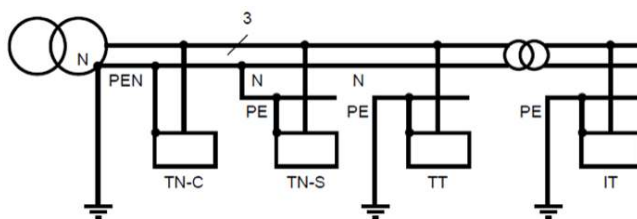


Figure 1. Example of various earthing systems included in the same installation [3]

2. Black Box Modeling of the system

The black box model is a simplified HF model to study the EMC behavior of the system proposed by [4]. A three-phase 4-wire version of this model has been developed for the OBC, as presented in Fig. 1. Measurements of DM and CM impedances have been done under the operating condition using the two-probe technique, developed by [5], and perturbation sources identification is done in the presence of the LISN and for several operating points for G2V and V2G modes.

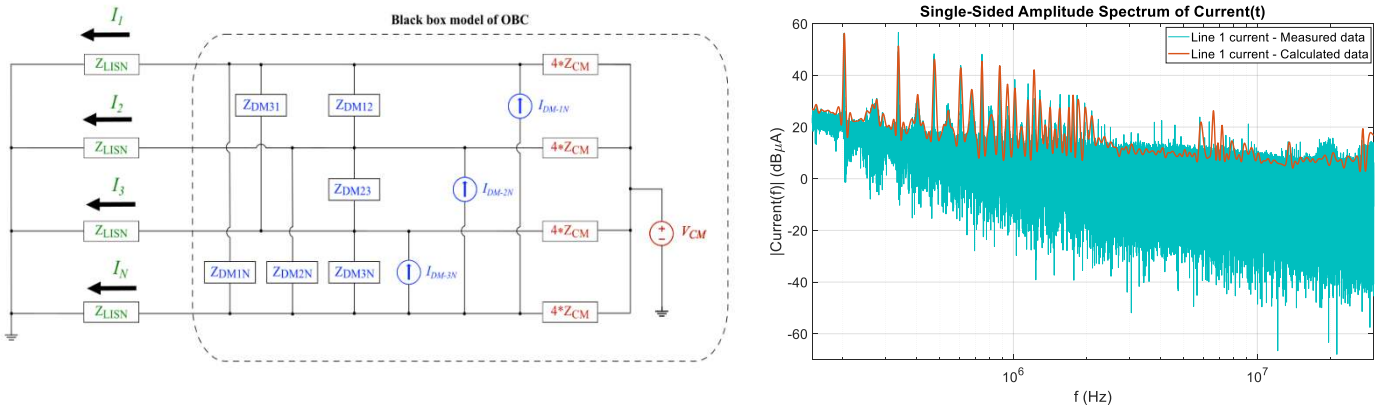


Figure 1. HF Black box model of the OBC and the results for 2A DC G2V operating mode.

3. Conducted emissions comparison in IT and TN-S systems

Fig. 2 presents the setup for conducted emissions measurements. The results in two grounding systems are measured and then compared. As an example, the measured CM current in the system with 5 meters of cable for 2A DC G2V is presented in Fig. 2 as well.

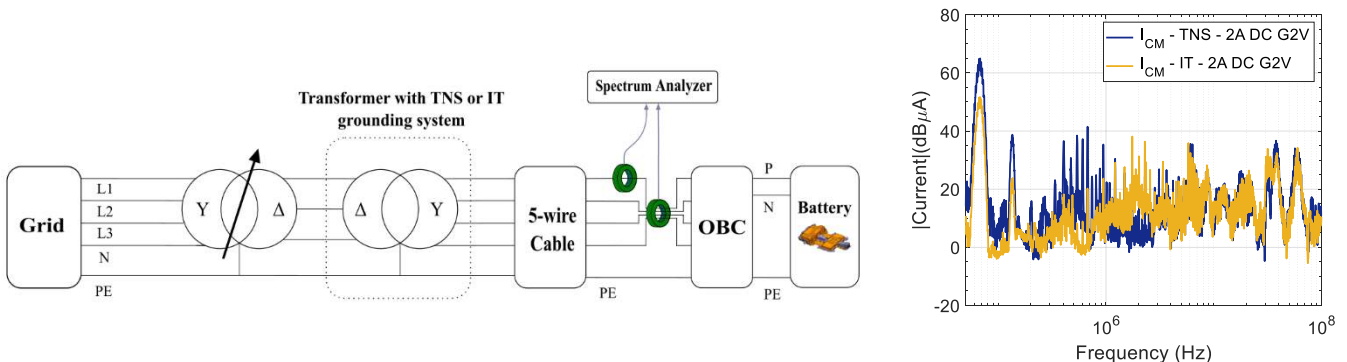


Figure 2. Setup for conducted emission measurements and results for CM current in the two cases.

4. Conclusion

The results show CM current level is highly dependent on the grounding system and IT system results a lower level of conducted emissions compared to TN-S. The outcomes of this study hold the potential to contribute to the design of high-performance EMC filters.

5. References

- [1] C. R. Paul, R. C. Scully, and M. Steffka, *Introduction to electromagnetic compatibility*, Third edition. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2022.
- [2] K.-R. Li, K.-Y. See, and R. M. Sooriya Bandara, "Impact Analysis of Conducted Emission Measurement Without LISN," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 58, no. 3, pp. 776–783, Jun. 2016, doi: 10.1109/TEMC.2016.2533539.
- [3] R. Calvas and B. Lacroix, "Cahier technique no. 172 Earthing systems in LV." Schneider Electric, 2002.
- [4] M. Amara, C. Vollaïre, M. Ali, and F. Costa, "Black Box EMC Modeling of a Three Phase Inverter," in *2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE)*, Aug. 2018, pp. 642–647. doi: 10.1109/EMCEurope.2018.8485007.
- [5] V. Tarateeraseth, B. Hu, K. Y. See, and F. G. Canavero, "Accurate Extraction of Noise Source Impedance of an SMPS Under Operating Conditions," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no. 1, pp. 111–117, Jan. 2010, doi: 10.1109/TPEL.2009.2024675.

Filtre Actif Haute Fréquence Pour Convertisseurs De Puissance AC/DC.

Sarah SIFOUNE^{1,2}, Denis LABROUSSE^{1,3}, Pierre-Etienne LÉVY¹, Cyrille GAUTIER², Bertrand REVOL²

¹ Université Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay, CNRS, SATIE, 91190, Gif-sur-Yvette, France.

² Safran Tech, SAFRAN Paris-Saclay, 78772, Magny-les-Hameaux, France

³ CNAM Paris, 292 Rue Saint-Martin, 75003 Paris, France

sarah.sifoune@ens-paris-saclay.fr

Résumé

Cet article propose un Filtre Actif Haute Fréquence (FAHF) pour réduire le volume et le poids des filtres passifs conventionnels utilisés pour réduire les interférences électromagnétiques. La solution retenue est un redresseur actif AC/DC (pont H) connecté en parallèle de la charge polluante. Basé sur l'injection de courant harmonique, il fournit les variations de courant des premières harmoniques de la fréquence de commutation sans affecter le fondamental. Le contrôle du filtre actif se fait à travers une boucle indépendante de la charge polluante afin d'obtenir une conception adaptative du filtre.

1. Introduction

Pour atteindre la neutralité carbone d'ici 2050, objectif fixé par l'Union européenne, le secteur aéronautique s'est engagé dans l'électrification des avions. Cela implique l'utilisation massive de convertisseurs de puissance qui rend le respect de la CEM plus compliquée, sachant que les filtres passifs largement utilisés sont souvent lourds et volumineux. Pour remédier à cela différentes solutions sont proposées soit des convertisseurs à commutation douce soit l'ajout de filtres actifs linéaires ou non linéaires.

Ces filtres actifs non linéaires ont rarement été étudiés pour des applications en CEM. Nguyen et al [1] visent à réduire les harmoniques dû au découpage HF d'un boost en utilisant un deuxième boost. Les deux convertisseurs partagent la même commande, ce qui rend le filtre totalement dépendant du convertisseur auquel il est rattaché. Il existe également des applications en AC pour le filtrage actif à des fréquences de commutation de quelques kHz[1–3]. Sato et al [4] ont proposé un filtre actif non linéaire indépendant pour réduire les harmoniques dû au découpage à une fréquence de 1,2 kHz d'un redresseur actif.

Cet article propose un FAHF totalement indépendant connecté en parallèle d'un convertisseur de puissance considéré comme charge polluante. Cette structure de FAHF associée à un contrôle approprié est efficace quelle que soit la charge avec une fréquence de commutation comprise entre 10-40 kHz. La conception et le contrôle du FAHF sont introduits et des résultats de simulation sont présentés et discutés.

2. Conception et contrôle de filtres actifs HF

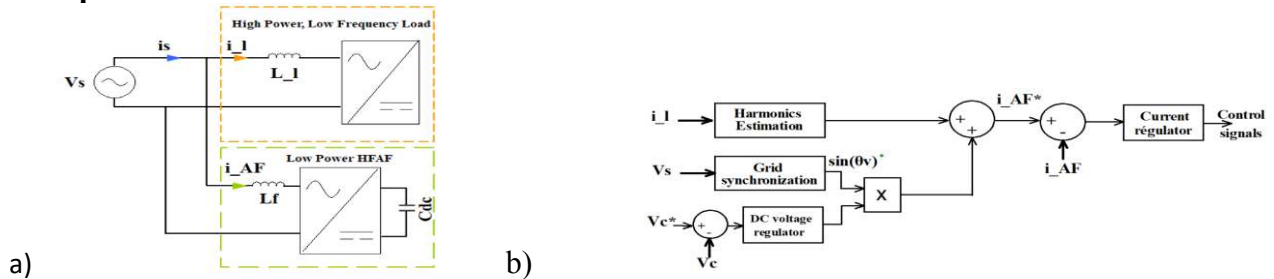


Figure 1 : a) Principe du FAHF et b) stratégie de contrôle.

Le FAHF se comporte comme une source de courant capable de fournir les variations de courant aux harmoniques dû à la fréquence de découpage, il doit donc avoir des performances dynamiques plus élevées que le convertisseur polluant. Ainsi, la fréquence de découpage du FAHF est au moins de l'ordre de 500 kHz. Le filtre est constitué d'un onduleur de tension avec des transistors GaN HEMT avec un stockage d'énergie capacitif et une inductance pour le contrôle du courant. Ainsi, il est constitué de trois fonctions : circuit de mesure, convertisseur contrôlé et circuit d'injection (Figure 1).

La stratégie de contrôle du filtre actif est basée sur l'injection parallèle du courant (i_{AF}) pour compenser

les harmoniques contenues dans le courant principal (i_L). La tension du bus continu (V_c) doit être régulée et correspondre à une partie active du courant i_{AF} , qui est en phase avec la tension du réseau (V_s), ce qui nécessite l'utilisation d'une PLL. La SOGI-PLL est utilisée pour sa stabilité et sa simplicité d'implémentation[5]. Pour identifier les harmoniques, une deuxième SOGI-PLL est utilisée (Figure 1).

3. Résultats

Pour évaluer les performances du FAHF, des simulations ont été effectuées sur MATLAB/Simulink. Les résultats sont présentés à la Figure 2. Il apparaît que le filtre actif est capable de baisser le niveau des harmoniques à 50 dB μ A jusqu'à la fréquence de découpage du HFAC (500 kHz). Par conséquent, les harmoniques dues à la commutation, sont repoussées de 20 kHz à 500 kHz avec le filtre actif. Cela permet au filtre passif d'être conçu pour une atténuation à 500 kHz, et donc de réduire le volume des éléments passifs, tout en respectant la norme DO160G (section 21).

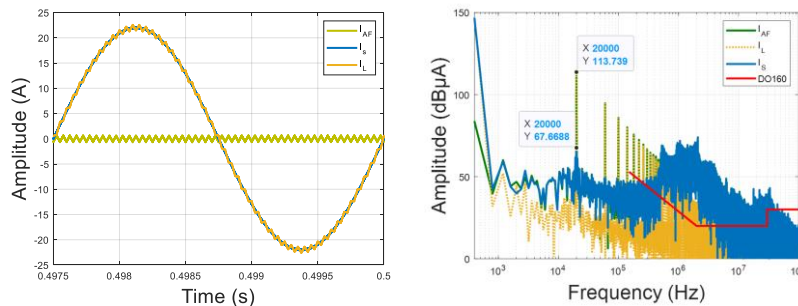


Figure 2 : Résultats de la simulation pour un HFAC, courants dans le domaine temporel et fréquentiel.

4. Conclusion

Un FAHF pour la réduction des interférences électromagnétiques en mode différentiel, ainsi que la conception et la stratégie de contrôle ont été présentés. L'indépendance du contrôle du FAHF par rapport au contrôle des charges polluantes rend le FAHF réutilisable pour différentes charges sans avoir à refaire le dimensionnement. Les résultats de simulation obtenus sont intéressants, ils démontrent l'intérêt du FAHF en rapportant les contraintes CEM sur le FAHF qui non seulement réduit le volume et le poids du filtrage passif en repoussant les harmoniques jusqu'à 500 kHz mais reporte également le dimensionnement du filtre passif sur le FAHF pour une plus grande indépendance par rapport à la charge polluante.

6. Bibliographie

- [1] D. T. Nguyen, C. Deng, E. Macias, et A. J. Hanson, « Synchronously Switched Active EMI Filter », in *2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Detroit, MI, USA: IEEE, oct. 2022, p. 1-8.
- [2] S. Papadopoulos, M. Rashed, C. Klumpner, et P. Wheeler, « Investigations in the Modeling and Control of a Medium-Voltage Hybrid Inverter System That Uses a Low-Voltage/Low-Power Rated Auxiliary Current Source Inverter », *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, vol. 4, n° 1, p. 126-140, mars 2016.
- [3] H. Bai, X. Wang, P. C. Loh, et F. Blaabjerg, « An Active Trap Filter for Switching Harmonic Attenuation of Low-Pulse-Ratio Inverters », *IEEE Trans. Power Electron.*, déc. 2017.
- [4] Y. Sato, K. Kawamura, H. Morimoto, et K. Nezu, « Hybrid PWM rectifiers to reduce electromagnetic interference », in *Conference Record of the 2002 IEEE Industry Applications Conference. 37th IAS Annual Meeting (Cat. No.02CH37344)*, Pittsburgh, PA, USA: IEEE, 2002, p. 2141-2146.
- [5] J. Xu, H. Qian, Y. Hu, S. Bian, et S. Xie, « Overview of SOGI-Based Single-Phase Phase-Locked Loops for Grid Synchronization Under Complex Grid Conditions », *IEEE Access*, 2021.

Development of a 5G Backscatter Communication Tag's Architecture for RF signal propagation in an urban environment

M. Lefki¹, S. Baccar², H. Shall³, M. Ghorbel¹, M. Kadi²

¹: University of Sfax, Tunisia, ATMS lab.

²: Normandy University, Rouen, IRSEEM Lab.

Mariem.lefki@groupe-esigelec.org

Abstract—Ambient backscatter communications (AmBC), is a novel technique that uses passive tags to establish connections with readers by exploiting reflected ambient (RF) signals. Our work involves three main axes : We develop a study focusing on 5G-AmBC achievable ranges and power levels by using propagation models. In particular, we are interested to propose an innovative sensor architecture essentially integrating the modulation block and an energy-harvesting block. Particular attention will be paid to modeling the effect of the human body depending on the location of the tag on overall performance.

1. Introduction

AmBC is a recent promising low-power and low-cost technique enhancing the wireless communication and uses existing (RF) signals, such as TV, FM and WiFi, as its carrier signal instead of generating RF signals on its own [1]. It is an idea based on the bi-static backscatter scenario and can be simplified since it requires only a transmitter, a tag (i.e. sensor) and a receiver. In [2] we presented an estimation of the received power at the sensor as well as the prediction range by imposing a sensitivity at the receiver. In [3, 4], the authors presented preliminary results of a wireless sensor node prototype for agricultural monitoring. Our approach consists of designing and manufacturing a novel version of the tag by integrating the energy-harvesting block and the modulation block.

2. AmBC System Model

Fig. 1 (left) shows a line of sight (LOS) bistatic backscatter scenario in an urban environment. It consists of an ambient RF source, a tag and a reader. In our study, a 3.5GHz band is considered as an ambient signal for the power link budget calculation. The tag receives and reflects a fraction of ambient signals back to the reader. Our aim is to evaluate the range value for an achievable 5G AmBC in outdoor environments. We used the propagation models in order to provide a more realistic estimation of the path loss value from the ambient source to the sensor and from the sensor to the RX. In our case, we combined the two models [5] in such a way that we used the UMa model to predict the power received at the sensor and the FSPL model to predict the power received at the RX.

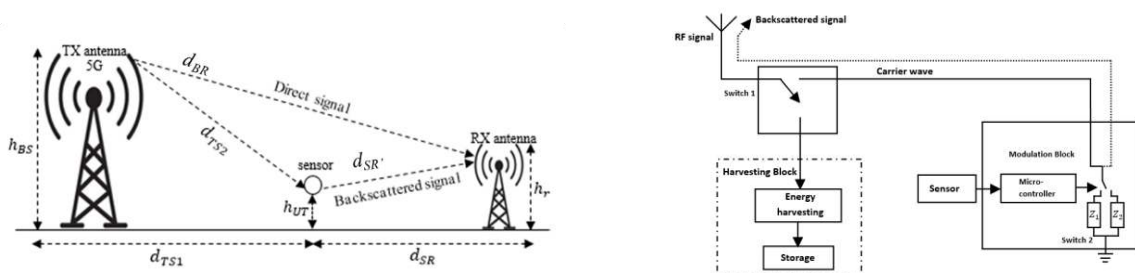


Fig 1. Ambient Backscatter : 5G bi-static scenario in an urban environment (left). The architecture of a backscatter tag (right).

The tag architecture (Fig. 1, right) consists of two main blocks: The RF energy-harvesting block and the modulation block. The tag is a passive node that harvests energy from an Ambient RF source, and also modulates and reflects a fraction of the wave back to the reader.

3. Simulation Results

3.1. Propagation RF signal

Bandwidth (BW)	$BW_1 = 5 \text{ MHz}$	$BW_3 = 20 \text{ MHz}$
Available Path Loss (APL)	$> 60 \text{ dB}$	$> 55 \text{ dB}$

Table 1 : Available Path Loss level

After our simulations, we noticed that the higher the APL level, the larger the BackCom range.

Antenna gain effect	BackCom range (m)	
$Gain_{Total} = 0\text{dBi} (G_S = G_R = 0\text{dBi})$	0.093	
$Gain_{Total}$ is variable	$Gain_T = 10\text{dBi}$	0.3 m
	$Gain_T = 20\text{dBi}$	0.93 m
	$Gain_T = 30\text{dBi}$	2.95 m
	$Gain_T = 40\text{dBi}$	9.32 m

Table 2 : Enhancing BackCom range with gain

3.2. Modulator circuit : Prototype

To better illustrate the feasibility of our ideas, we have built a hardware prototype. Our prototype includes an MSP430 development board connected with a modulator circuit. The modulator circuit consists of the RF switch, 5G antenna and a sensor (Fig. 2).



Fig 2. Photos of physical PCB (top and bottom).

4. Conclusion

- Study focusing on 5G-AmBC feasible ranges and power levels by using propagations models.
- Modeling the architecture of a backscatter Tag using Matlab Simulink.
- Design and Implementation for an Ambient Backscatter Communications (AMBC) Modulator (Tag).

5. Acknowledgments

The authors would like to thank SYSCORE project for funding of this research. This work was supported by the SYSCORE project (a cooperation between the Normandy Region and ESIGELEC).

6. References

- [1] V. Liu, et al., « Ambient backscatter: wireless communication out of thin air », in Proceedings of the ACM SIGCOMM 2013 conference on SIGCOMM, Hong Kong China, august 2013, p. 39-50.
- [2] M. Lefki et al., «5G Ambient Backscatter Communications: Achievable Range and Power Levels in an Urban Environment», in IEEE RFID-TA 2022, September 2022, DOI:[10.1109/RFID-TA54958.2022.9924037](https://doi.org/10.1109/RFID-TA54958.2022.9924037).
- [3] S. N. Daskalakis, J. Kimionis, A. Collado, G. Goussetis, M. M. Tentzeris and A. Georgiadis, “Ambient Backscatterers using FM Broadcasting for Low Cost and Low Power Wireless Applications”, in IEEE TMTT, vol. 65, no. 12, pp. 5251-5262, November 2017.
- [4] S. N. Daskalakis, J. Kimionis, A. Collado, M. M. Tentzeris, and A. Georgiadis, “Ambient FM Backscattering for Smart Agricultural Monitoring,” in Proc. IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. (IMS), Honolulu, HI, USA, Jun. 2017, pp. 1339–1341.
- [5] «Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz», European Telecommunications Standards Institute (ETSI). (2020). (3GPP

TR 38.901 version 16.1.0 Release 16).

Conception d'un illuminateur local en onde quasi-plane en bande L

S. Barouki¹, P. Hoffmann¹
¹ : CEA Gramat,
 sami.barouki@cea.fr

Résumé

Cette contribution expose les idées qui prévalent à la conception d'un prototype de laboratoire permettant l'agression électromagnétique (EM) de système en onde plane localisée pour l'étude de la susceptibilité électromagnétique. Les structures électroniques étant de plus en plus complexes, il est difficile de différencier les effets d'une agression électromagnétique globale sur un système. Une approche d'illumination locale est donc nécessaire. L'une des possibilités est l'utilisation d'un rayonnement en champ proche. Cependant, ce moyen ne permet pas la connaissance exacte de la forme d'onde incidente due à la proximité entre la sonde et le système sous test.

La solution locale retenue pour cette contribution est l'utilisation d'un ensemble antenne-lentille diélectrique, permettant la focalisation de signaux en bande L sur circuit imprimé tout en conservant un rayonnement en ondes planes.

Mots-clés : antenne, onde plane, électronique, locale, lentille, diélectrique, focalisation.

1. Introduction

Le projet exposé est un prototype de laboratoire d'illumination en ondes planes localisées pour étudier la susceptibilité électromagnétique des systèmes électroniques vis-à-vis des agressions électromagnétiques intentionnelles (AGREMI). Le dispositif de rayonnement retenu, MEDUSE, sera appliqué sur un robot générique, développé par Texas Instruments pour l'apprentissage de la robotique. Les signaux engendrés par ce dispositif doivent permettre d'exciter un type particulier de susceptibilité, la détection active [1] sur la carte de commande numérique du robot. Généralement, l'excitation de la susceptibilité fait appel à l'une des trois méthodes expérimentales illustrées en Fig. 1 a), b), c). La méthode la plus appropriée pour caractériser un type particulier de susceptibilité est l'approche par injection conduite Fig. 1 a). Ce travail est effectué généralement sur des cartes développées ad hoc mais est difficilement transposable à une agression plus proche de la réalité opérationnelle. On utilise alors une approche par illumination globale en champ lointain qui reflète la réalité d'une attaque AGREMI (Fig. 1 b). Cette approche permet également la détermination exacte de la forme d'onde du signal incident, celui-ci se propageant sous forme d'ondes planes. Cependant, il est très difficile de discriminer les effets et d'isoler les paramètres d'influence de la forme d'onde. Pour discriminer les effets, tout en restant en illumination, une troisième approche consiste à utiliser des sondes électriques ou magnétiques en champ proche (Fig. 1 c) permettant la localité de l'agression donc la discrimination des effets. Cependant, il existe une forte interaction EM entre la sonde et la cible, ce qui rend la détermination de la forme d'onde couplée quasi-impossible.

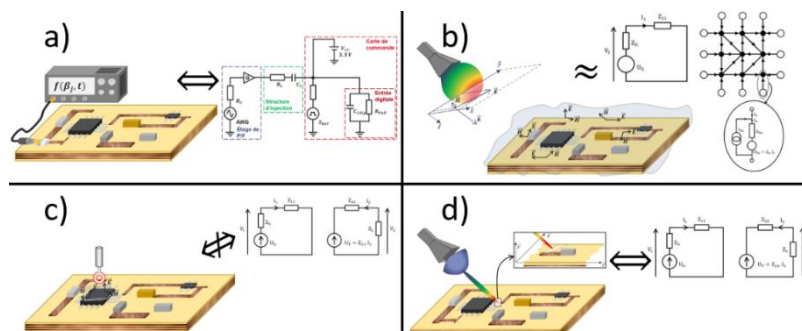


Figure 1: Différentes méthodes d'études de la susceptibilité électromagnétique

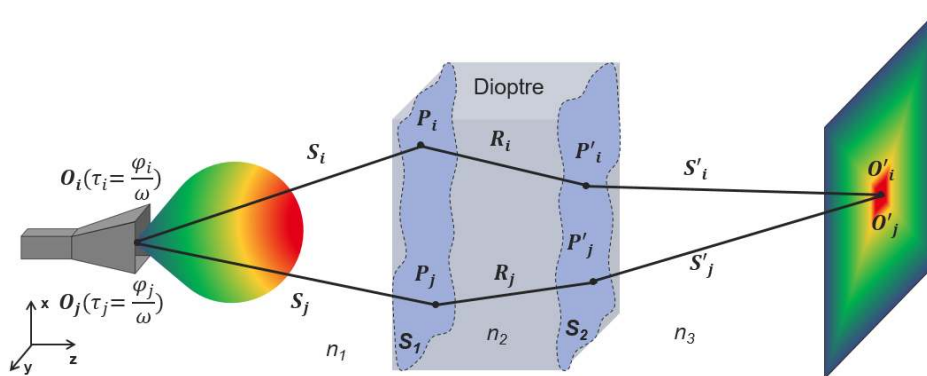
Toutes ces raisons nous ont conduits à développer le dispositif MEDUSE (Fig. 1 d) qui conserve en sortie de lentille un signal de type onde plane dont on peut connaître précisément les caractéristiques et qui permet une agression localisée par le fait de la focalisation.

2. Propagation optique et micro-ondes

Suite à une étude bibliographique sur la focalisation d'ondes planes, notre choix de dispositif s'est porté sur un ensemble antenne-lentille diélectrique [2]. En nous appuyant sur une approche d'optique géométrique, nous cherchons à déterminer la forme idéale de notre lentille permettant d'assurer la surface de focalisation déterminée. La bande de fréquence d'agression, définie par des travaux antérieurs sur le type de susceptibilité retenu, impose une taille conséquente à la structure d'émission. Un premier prototype d'illumination à plus haute fréquence (réduction de taille) est en cours de réalisation pour valider notre modèle de propagation et permettre des expérimentations dans une structure de taille réduite. Lorsque tous les paramètres de conception auront été déterminés, un facteur d'échelle sera appliqué pour concevoir l'illuminateur dans sa bande d'intérêt pour le type de susceptibilité envisagé.

Une expérimentation dans le domaine visible est également mise en œuvre en comparant par analogie les trajets parcourus par un rayon laser et ceux parcourus par les rayons assimilés au vecteur de Poynting de chaque plan d'onde issu de l'antenne d'émission du dispositif MEDUSE (cf. Figure 2). En parallèle d'un développement théorique, des simulations paramétriques ont été effectuées par utilisation du code de calcul CST Studio Suite.

Figure 2 : Lancer de rayons adapté au micro-ondes



3. Conclusion

Dans cette contribution, nous proposons un nouveau moyen d'étude de la susceptibilité électromagnétique. Le système est en cours de développement dans le cadre de la thèse de l'auteur¹. Un premier prototype est en cours de réalisation en bande X afin de valider le modèle de propagation et de permettre de déterminer les éléments qui prévalent à la loi d'échelle.

4. Remerciements

Les auteurs remercient le CEA Gramat et le Ministère des Armées – Agence Innovation Défense pour leurs soutiens.

5. Bibliographie

- [1] C. Pouant, F. Torres, A. Reineix, P. Hoffmann, J. Raoult and L. Chusseau, Modeling and Analysis of Large-Signal RFI Effects in MOS Transistors, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. **61**, no. 1, pp. 111-120, Feb. 2019.
- [2] R. K. Luneburg, M. Herzberger, E. Wolf, Mathematical theory of optics, University of California Press, Berkeley and Los Angeles, 1966.

Caractérisation et modélisation haute fréquence des bobinages statoriques pour la prise en compte de la CEM et de la fiabilité électromagnétique dans les motorisations électriques.

S. Coutin^{1,3}, J.-M. Dienot^{1,2}, R. Ruscassié¹, I. Ramos³, V. Gavrilenko¹, A. Petre¹

¹ : Université de Pau et des Pays de l'Adour/E2S UPPA, Laboratoire SIAME – Fédération IPRA, EA4581, 64000 Pau, France

² : Université de Toulouse III, Laboratoire Labceem, 65000 Tarbes, France

³ NOVATEM SAS, 31400 Toulouse, France.

steven.coutin@novatem-sas.com / jeanmarc.dienot@iut-tarbes.fr

Résumé

La caractérisation et la modélisation des bobinages statoriques sur une large bande de fréquence représente aujourd'hui un nouvel enjeu dans la chaîne de motorisation entièrement électrique pour les systèmes embarqués et mobiles. Nous présentons différentes approches de modélisation et de caractérisation visant à affiner les modèles comportementaux orientés CEM et fiabilité électromagnétiques de ces éléments de la chaîne de conversion. Dans cette étude, une « microstrip » à anneau résonant (MAR) est utilisée pour déterminer par simulation numérique la permittivité relative d'échantillons de résine époxy, dans la bande des ultras hautes fréquences (300MHz – 3GHz). Les éléments théoriques permettant de dimensionner la MAR sont détaillés. Les mesures servant de référence dans cette étude sont présentées. En complément, des caractérisations basées sur les paramètres S et la variation des impédances de mode commun et différentiel des bobinages sont passées en revue, et permettent d'affiner des modélisations multiphysique de ces éléments sur une grande bande de fréquences.

1. Introduction

Dans les actionneurs électriques actuels, les bobinages statoriques alimentés par des convertisseurs fonctionnant avec des semi-conducteurs à grand gap font face à des contraintes électromagnétiques et électroniques plus sévères que celles rencontrées jusqu'alors[1]. Le suivi de « l'état de santé » de ces actionneurs électriques lié à cette forte activité électromagnétique permet d'augmenter la fiabilité électromagnétique de ces structures. La caractérisation fréquentielle des propriétés des matériaux diélectriques peut notamment se faire à l'aide d'antennes, qui permettent de surveiller et de diagnostiquer les variations de champ EM de nos structures durant leur activité [2]. Nous proposons une technique utilisant un design d'antenne champ proche dite « microstrip à anneau résonant » (MAR) adaptée à la caractérisation de permittivité relative de matériaux diélectriques utilisés pour la conception de nouveaux bobinages hautes-performances [3]. Les aspects théoriques du dimensionnement de la MAR, la mise au point des simulations et les résultats obtenus seront présentés et discutés [4]. Cette étude s'intègre dans une étude plus large sur la signature spectrale des bobinages, dans une bande de fréquence pouvant être étendue jusqu'au Gigahertz.

2. Description de la structure développée

La structure de « microstrip » à anneau résonant se compose d'un plan de masse, d'un substrat diélectrique, de pistes conductrices et d'un anneau conducteur, séparé des pistes conductrices par un « gap » où prend place le couplage électromagnétique (Figure 1). Sa précision et sa sensibilité plus élevées que les structures « microstrip line » expliquent le choix de cette structure pour notre étude. La mesure de paramètres S nous permet ensuite d'extraire les informations sur les variations d'impédances et de transmissions significatives de l'échantillon testé. En effet, lorsqu'une onde traverse cette structure, on peut observer des résonances sur la mesure des paramètres S lorsque la longueur d'onde est un multiple entier de la circonférence de l'anneau (proportionnel à son rayon R).

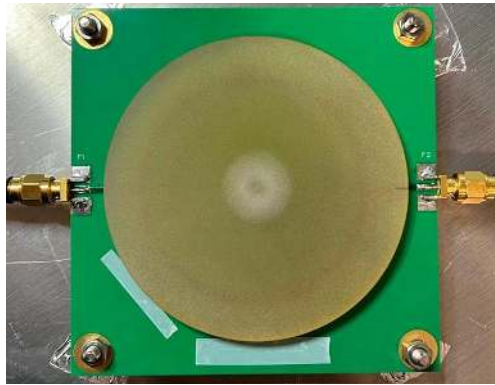


Figure 1. MAR et échantillon utilisés pour la mesure

3. Résultats

Quatre séries de mesure ont été réalisées, en modifiant à chaque fois la position de l'échantillon de 90° par rapport à la position initiale de 0° choisie arbitrairement. Une série de mesure correspond à une moyenne de 5 mesures, où l'échantillon a été retiré puis replacé sur la MAR à chaque mesure pour réduire les écarts liés au placement de l'échantillon sur la microstrip. Les extractions des variations de permittivité ont été comparées avec des simulations numériques sur solveur 3D (CST)

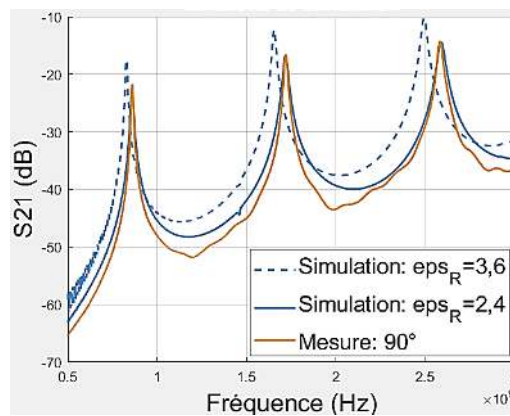


Figure 2: Comparaison simulation/mesure avec échantillon

4. Conclusion

La méthode présentée a permis d'obtenir une valeur de permittivité relative de l'échantillon testé dans la bande UHF. Des essais complémentaires doivent être réalisés pour valider ce résultat (spectroscopie diélectrique, autre MAR...). L'étude pourrait également être complétée en modifiant le substrat et les dimensions de la MAR, pour notamment déterminer la permittivité relative sur une plus grande plage de fréquence.

5. Bibliographie

- [1] M. Kilper, S. Fickel, H. Naumoski, et K. Hameyer, « Effects of Fast Switching Semiconductors Operating Variable Speed Low Voltage Machines », in *2019 9th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*, Esslingen, Germany, déc. 2019, p. 1- 7. doi: 10.1109/EDPC48408.2019.9011884.
- [2] A. Decner, M. Baranski, T. Jarek, et S. Berhausen, « Methods of Diagnosing the Insulation of Electric Machines Windings », *Energies*, vol. 15, n° 22, p. 8465, nov. 2022, doi: 10.3390/en15228465.
- [3] A. Rashidian, M. Aligodarz, et D. Klymyshyn, « Dielectric characterization of materials using a modified microstrip ring resonator technique », *IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul.*, vol. 19, n° 4, p. 1392- 1399, août 2012, doi: 10.1109/TDEI.2012.6260016.
- [4] T. Weiland, M. Timm, et I. Munteanu, « A practical guide to 3-D simulation », *IEEE Microwave*, vol. 9, n° 6, p. 62- 75, déc. 2008, doi: 10.1109/MMM.2008.929772.

Posters GT6

Experimental investigation of multiple ultrasound scattering in dense granular suspensions

A. Le Ber, Y. Liu, A. Aubry, A. Tourin, X. Jia

Institut Langevin, ESPCI Paris, Université PSL, CNRS, 1 rue Jussieu, 75005 Paris

in collaboration with R. Pierrat and F. Ramaz

Email: xiaoping.jia@espci.fr

Résumé

We investigate the pulsed ultrasound scattering in dense packings of glass beads (different size d) saturated by water. By measuring the temporal evolution of the acoustic intensity profile, we monitor the transition from the ballistic propagation to the diffusive transport, as a function of the incident wave (central) frequency or wavelength l and the source-detector distance L . We infer the transport parameters such as the absorption time and the mean scattering or transport free paths, respectively, by the use of the radiative transfer equation or the diffusion model.

Microscopie super-résolue par illumination de speckle en profondeur de champ étendue

Lorry MAZZELLA¹, Benoit ROGEZ¹, Guillaume GIROUSSENS¹, Thomas MANGEAT², Jérôme IDIER³, Frédéric GALLAND¹, Simon LABOUESSE⁴, Mehdi SAADAOU⁴, Carla MARTINS¹, Marc ALLAIN¹, Anne SENTENAC¹, Loïc LE GOFF¹

¹ : Institut Fresnel, CNRS, Aix Marseille Université, Centrale Marseille, 13013 Marseille, France,

² : LITC Core Facility, Centre de Biologie Intégrative, Université de Toulouse, CNRS, UPS, 31062 Toulouse, France

³ : LS2N, CNRS, Université de Nantes, Nantes, France

⁴ : Aix Marseille Université, CNRS, IBDM, UMR 7288, Marseille, France

Lorry.mazzella@fresnel.fr

Résumé

Nous présentons une nouvelle technique de microscopie associant au principe d'illumination structurée une profondeur de champ étendue. Nous obtenons des images 2D super résolues sur une grande profondeur de champ en un temps significativement réduit par rapport à une approche plan par plan. Le potentiel de la technique est illustré sur des cellules en culture et sur des tissus embryonnaires.

1. Introduction

La biologie moderne utilise les microscopes de fluorescence pour imager de grands ensembles cellulaires à haute résolution, par exemple dans les embryons en développement. Les reconstructions 3D sont obtenues en imageant plan par plan l'intégralité de l'échantillon. L'inconvénient de ce procédé est la grande durée de l'acquisition nécessaire pour scanner entièrement l'objet d'intérêt. Ceci est d'autant plus prononcé pour les techniques d'illumination structurée où plusieurs images d'un même plan sont nécessaires pour obtenir de la super-résolution. Une façon courante de régler ce problème de lenteur dans le cas d'objets peu denses est d'augmenter la profondeur de champ du système (*Extended Depth of Field* : EDF) pour réduire le nombre d'images nécessaires à l'imagerie de l'objet et ainsi diminuer la durée de l'acquisition. Bien que plus rapide, cette approche communément utilisée avec un éclairage en champ large (EDF-WF) souffre d'une forte sensibilité au « bruit de fond » ainsi que d'une résolution limitée par le phénomène de diffraction. Nous proposons donc de combiner la rapidité de l'imagerie par profondeur de champ étendue avec une technique d'illumination structurée appelée *Random Illumination Microscopy* (RIM). Cette association appelée EDF-RIM permet une meilleure résolution latérale que l'EDF-WF, réduit significativement le bruit de fond et ne nécessite pas la connaissance de l'illumination.

2. Méthode et résultats

Comme toute technique à illumination structurée la méthode proposée nécessite l'acquisition d'une série d'images de l'objet éclairé par différentes illuminations afin de reconstruire numériquement une image super-résolue. Conformément à la technique RIM [1], nous utilisons des illuminations qui sont des speckles pleinement développés, chaque speckle étant une distribution homogène, très contrastée et 3D de points brillants. Une acquisition 3D par RIM utilise un scan axial pour effectuer de multiples acquisitions 2D, plan par plan et sous une variété d'illuminations. A l'opposé, notre technique (EDF-RIM) utilise une seule acquisition 2D par illumination où les structures 3D apparaissent projetées selon la direction axiale (Fig .1b). Ce type d'acquisition est rendu possible grâce à une lentille électriquement accordable, placée dans un plan de Fourier du microscope, et qui permet un scan rapide selon Z de l'objet au cours d'une seule exposition de la caméra (Fig .1a). Tout comme RIM, notre méthode s'appuie sur un traitement numérique des acquisitions qui nécessite uniquement la connaissance des propriétés statistiques du speckle. Ces dernières étant insensibles aux aberrations, notre méthode n'est donc pas limitée en Z, même pour un milieu très diffusant. Le traitement de nos données EDF-RIM se fait *via* le logiciel AlgoRIM [1] et fournit une image plus résolue et plus contrastée qu'en EDF-WF. Il importe de noter que comme toute technique à

profondeur de champ étendue, l'EDF-RIM ne permet pas *a priori* de sectionnement axial. Cependant, pour les échantillons où la fluorescence est distribuée sur une surface courbe, il est possible d'estimer la surface avec un seul scan plan par plan pour un speckle donné. Cette acquisition 3D est bruitée et peu résolue, mais est suffisante pour estimer la surface via un algorithme dédié [2]. Il suffit alors de projeter le résultat de l'EDF-RIM sur la surface estimée pour reconstruire une image 3D de l'objet.

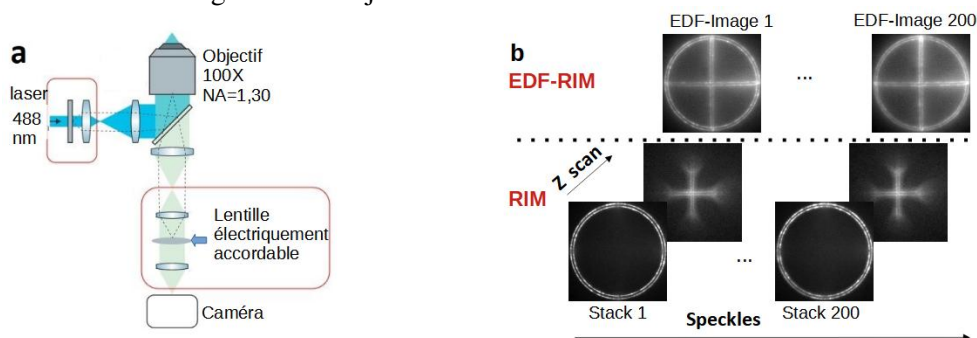


Figure 1. (a) Montage expérimental (b) Comparaison du protocole d'acquisition EDF-RIM (en haut) et RIM (en bas), illustrée sur la sphère d'Argo-SIM slide

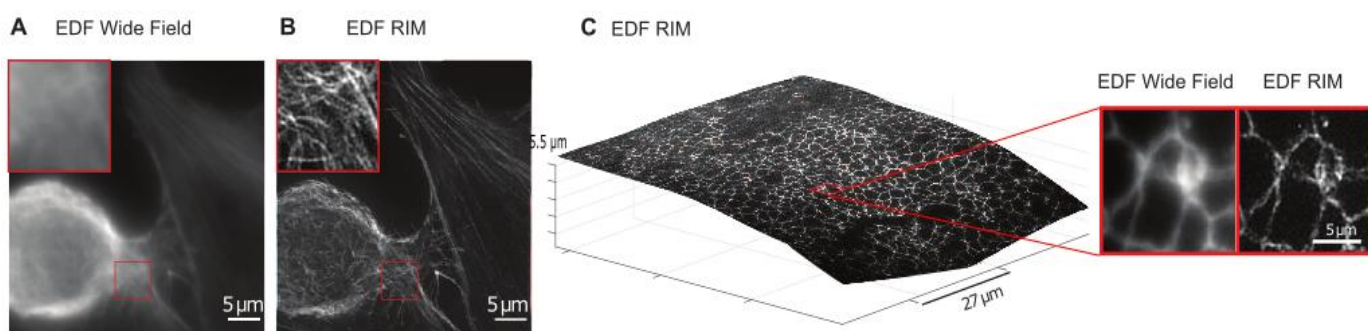


Figure 2. Comparaison de l'EDF-WF (a) et de l'EDF-RIM (b) sur une cellule humaine marquée. (c) : Projection de l'image EDF-RIM d'un tube neural de poulet sur la surface estimée au préalable (via un scan 3D avec une illumination de speckle)

3. Conclusion

En conclusion, nous avons mis au point le premier microscope à illumination structurée en champ large, qui combine la super-résolution avec une profondeur de champ étendue. Pour ce faire, nous nous appuyons sur le cadre du microscope à illumination aléatoire (RIM), combinant la nature intrinsèquement 3D du speckle avec une détection de profondeur étendue. L'EDF-RIM apparaît comme une alternative attrayante à l'EDF classique à champ large lorsqu'une haute résolution spatiale et un faible bruit de fond sont nécessaires, par exemple dans le contexte du suivi moléculaire à haute résolution ou de l'imagerie des tissus.

4. Bibliographies

- [1] Mangeat et al., Super-resolved live-cell imaging using random illumination microscopy, Cell Reports Methods (2021), <https://doi.org/10.1016/j.crmeth.2021.100009>,
[2] Abouakil et al., An adaptive scanning strategy for the imaging of biological surfaces. Light : science and applications 10, 210 (2021). DOI : 10.1038/s41377-021-00649-9

CSSNet - Classification spectrale supervisée d'acquisitions codées d'images hyperspectrales

Léo Paillet¹, Antoine Rouxel¹, Maud Biqard¹, Hervé Carfantan², Simon Lacroix¹,
 Antoine Monmayrant¹

¹ : LAAS-CNRS, Toulouse ; ² : IRAP, Toulouse
 leo.paillet@laas.fr

Résumé

Nous présentons les résultats obtenus lors de la classification spectrale supervisée d'images hyperspectrales codées, obtenues à partir d'un imageur hyperspectral double-disperseur CASSI (Coded Aperture Snapshot Spectral Imager) simulé de manière réaliste [1].

1. Introduction

Une image hyperspectrale est un cube de données selon deux dimensions spatiales x et y et une dimension spectrale λ . Les imageurs double-disperseur CASSI permettent d'acquérir l'image hyperspectrale entière, via un balayage du cube, mais également de compresser ce cube dès l'acquisition pour obtenir une acquisition codée 2D (x, y) décrivant la scène. Ceci se fait à l'aide de masques programmables (matrices de micromiroirs) appliqués lors des acquisitions. Ces acquisitions codées permettent une réduction du stockage nécessaire, du temps d'intégration ainsi que de la quantité de données à transmettre.

La classification d'images hyperspectrales est utile dans de nombreux domaines: observation de la terre, contrôle qualité, biomédical, Toutefois, la majorité de la littérature se concentre actuellement sur la classification à partir d'images hyperspectrales complètes. Lorsque l'application est connue, des acquisitions codées bien choisies permettent de décrire la scène et d'obtenir une classification précise à partir de peu de données: notre travail se concentre sur ce point.

Notre approche de classification d'acquisitions codées exploite un réseau neuronal CSSNet qui permet de s'approcher des résultats de classification avec les images complètes tout en ayant une compression dès l'acquisition pouvant aller jusqu'à un facteur 50. Les travaux présentés ici montrent que ces résultats s'améliorent en prenant en compte plusieurs acquisitions codées. Nous avons également effectué une étude de la robustesse au bruit de notre système.

2. Description de la structure étudiée

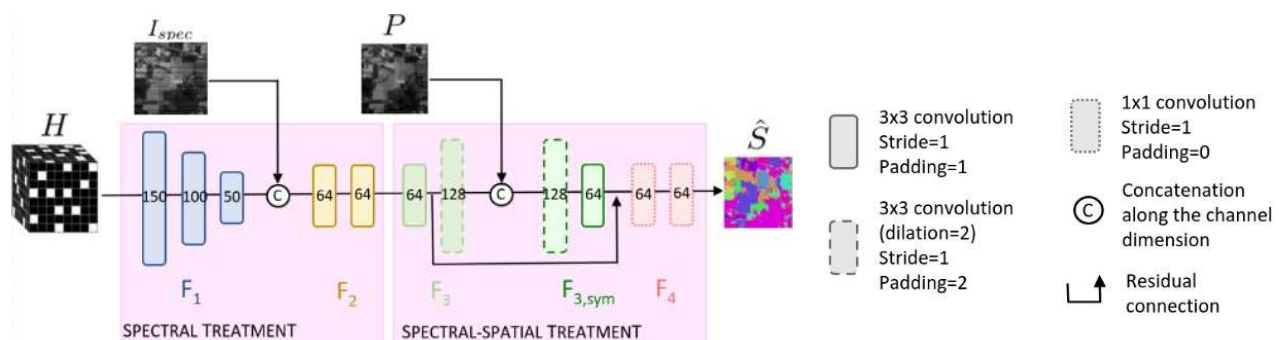


Figure 1. Architecture de CSSNet

Le réseau CSSNet [2] illustré Figure 1 prend trois éléments en entrée: l'acquisition codée I_{spec} , l'image panchromatique P , ainsi que le cube de filtrage H (voir figure 1). Le cube de filtrage est induit par le masque utilisé dans l'imageur. L'image panchromatique (intégrée sur toutes les bandes spectrales) correspond à une acquisition effectuée avec tout le masque ouvert. Le réseau a donc uniquement besoin de 2 acquisitions pour produire une classification.

L'entrée du réseau est découpée en patch de taille 7x7. Toutefois, à cause du faible nombre de scènes labellisées disponibles, l'entraînement et le test s'effectuent à partir d'une seule image hyperspectrale, à partir de laquelle plusieurs acquisitions codées ont été simulées. Celles-ci sont strictement séparées de sorte qu'aucun pixel ne soit commun lors de l'entraînement et du test. Les patches correspondant à l'entraînement et au test sont choisis aléatoirement afin que 80% des pixels de chaque classe soient dans l'entraînement, et que les 20% restant soient utilisés lors de la phase de test. La méthode de création des patches a été récemment améliorée pour offrir une plus grande diversité dans l'entraînement et donc de meilleurs

résultats de classification, cela sera décrit lors de notre contribution.

CSSNet est composé de différentes couches convolutives permettant un traitement spectral puis un traitement spectrospatial. Des connexions résiduelles sont employées pour contrôler les gradients lors de l'entraînement. L'architecture est inspirée du réseau DSSNet, qui a été développé pour classifier des images hyperspectrales complètes [3].

Nous avons proposé d'étendre le réseau CSSNet pour exploiter plusieurs acquisitions. Plusieurs méthodes de fusion de données ont ainsi été employées pour améliorer les résultats à partir de plusieurs acquisitions: moyenne, pondération, réseau MLP, réseau LSTM, et un travail en cours sur une fusion probabiliste. Ces méthodes de fusion seront explicitées lors de la présentation.

3. Résultats

Les résultats ont été produits à partir du dataset Pavia University, qui est une scène hyperspectrale étiquetée contenant 103 bandes spectrales pour la scène complète. Des exemples de résultats de classification de la structure présentée (Fig .1) sont donnés dans le tableau suivant. Nous détaillerons dans la présentation les structures utilisées pour la fusion, les résultats obtenus ainsi que leur robustesse au bruit de mesure. Différentes métriques ont également été prises en compte avec des résultats similaires, elles seront développées lors de la présentation.

Architecture	Nb acq	Précision (%)
DSSNet	103	98.8
CSSNet	2	96.0
CSSNet + moyenne	4	97.3
CSSNet + MLP	4	98.5

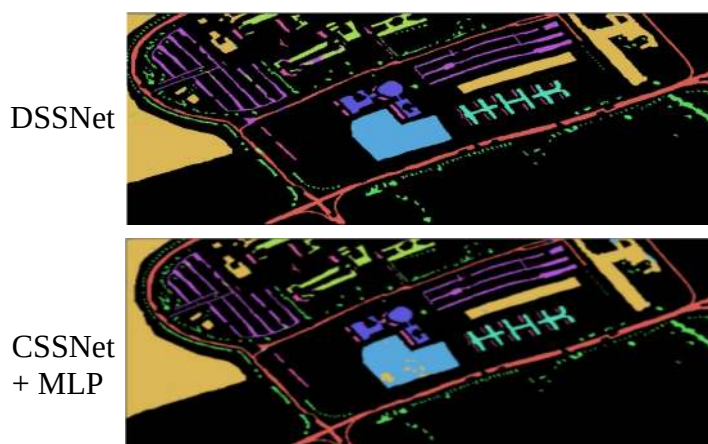


Figure 2 : (gauche) Résultats de classification avec 103 bandes spectrales (DSSNet) et avec quelques acquisitions codées (CSSNet). (droite) Chaque couleur correspond à une classe de la scène.

4. Conclusion

Dans cette contribution, nous avons montré l'intérêt des images codées pour classifier des scènes hyperspectrales. La compression du temps d'intégration et des données d'un facteur allant jusqu'à 50 ne résulte qu'en une perte de quelques pourcents en précision de classification, les résultats étant comparables avec l'état de l'art sur des images hyperspectrales complètes. En utilisant plusieurs acquisitions codées, nous pouvons également améliorer notre précision de classification. Une première analyse à la robustesse au bruit a également été effectuée pour la classification en images complètes et en acquisitions codées simples ou multiples. A l'avenir, nous traiterons de la fusion d'acquisitions de manière itérative, dans un cadre adaptative où le nombre d'acquisitions n'est pas connu au départ, le masque sera alors reprogrammé entre chaque itération pour améliorer la précision de classification.

5. Bibliographie

- [1] Antoine Rouxel, <https://github.com/a-rouxel/simca>
- [2] Maud Biqard et al., CSSNET: A Learning Algorithm for the Segmentation of Compressed Hyperspectral Images
- [3] Pan et al., DSSNet: A Simple Dilated Semantic Segmentation Network for Hyperspectral Imagery Classification, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters

Open channels and dwell-time eigenstate in resonant disordered media

Romain Rescanieres¹, Romain Pierrat¹, Arthur Goetschy¹

¹ : Institut Langevin, ESPCI Paris PSL
romain.rescanieres@espci.psl.eu

Résumé

Transport of light through disordered media exhibits various behaviors depending on the disorder strength. In the linear regime, one can gain insight on how light interacts with the medium by investigating the statistical properties of the scattering matrix. Historical results were obtained by considering non-resonant scattering systems. Using wave-front shaping techniques, experimental and numerical works confirmed theoretical predictions based on random matrix theory. In this work, we present numerical results based on a microscopic description of systems entirely made out of resonant point-like scatterers in a wave-guide. Our approach allows to access light transmission and energy storage (or dwell-time) in these systems. Their resonant behavior engenders strong frequency-dependent response to incident wave-fronts. This feature allows to switch between transport regimes while fixing the density of scatterers. Consequently, we show that light can travel ballistically, diffusively or even be localized in a given sample, by only tuning the incident field frequency. By shaping the incident wave-front, we can access the well-known open and closed channels in transmission and study the spatial distribution of the electric field in each regime. We find that maximally transmitting channels in the localized regime resemble previously described necklace states.

1. Introduction

Although resonant systems are at the heart of atomic optics and nanophotonics, coherent transport in resonant disordered media has not been studied yet. In this work, we evaluate the statistical properties of the transmission matrix and the dwell-time operator of a two-dimensional wave-guide filled with resonant light scatterers. This allows to study different transport regimes as a function of the frequency of light.

2. Description de la structure étudiée

We consider a two-dimensional wave-guide filled with resonant light scatterers, that can be thought of as two-level atoms. These scatterers are randomly packed in the medium with no spatial correlations as sketched in Fig. 1.

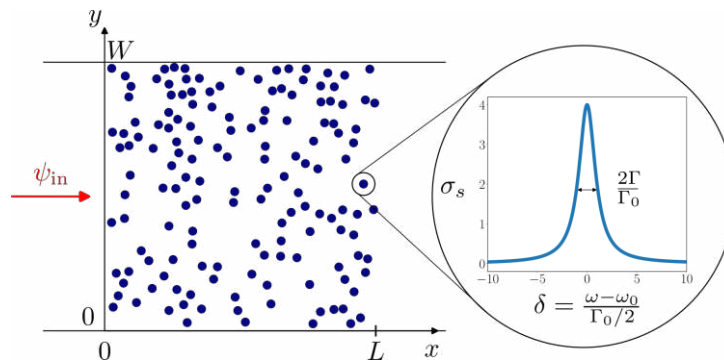


Figure 1. Sketch of the situation under study.

The behavior of these resonant scatterers is extremely sensitive to the frequency of the incident light. Thus, the transport regime that light undergoes in such a setting can drastically vary depending on that frequency.

3. Résultats

By investigating the spectrum of the transmission matrix and the dwell-time operator, we show that light transport regime in a resonant disordered medium can be tuned using the incident field frequency.

Eigenvalue distributions are evaluated in the different regimes (ballistic, diffusive and localized) as well as intensity maps of the corresponding eigenvectors. We show that the scaling of the maximal dwell-time (thus the maximal amount of deposited energy inside the medium) can be understood by taking into account the resonant behavior of the mean-free path and the energy velocity.

4. Conclusion

Using wave-front shaping in resonant disordered media allows to access states of maximal energy deposition. The response of those media is very sensitive to the incident field frequency, allowing a transition between transport regimes.

5. Bibliographie

- [1] O. Dorokhov, *Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters* **36** (1982).
- [2] P.A. Mello et al., *Annals of Physics* **181.2** (1988).
- [3] R. Pierrat et al., *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A.* **111** (2014).
- [4] M. Durand et al., *Phys. Rev. Lett.* **123.24** (2019).

Le seuil de mobilité d'Anderson vu comme une transition de percolation du paysage de localisation

M. Vrech¹, M. Filoche¹

¹Institut Langevin, ESPCI Paris, PSL Université, CNRS, 1 rue Jussieu, Paris 75005 France,
margaux.vrech@espci.fr

Nous présentons une étude du seuil de mobilité d'Anderson à 3D sur réseau cubique, seuil qui délimite la délocalisation des fonctions d'onde électroniques dans un potentiel désordonné, en utilisant la théorie du paysage de localisation développée par Filoche et Mayboroda [1]. La localisation d'Anderson [3] décrit la transition des fonctions d'onde d'un électron dans un potentiel désordonné, d'une phase localisée à basse énergie à une phase délocalisée à haute énergie. Nous montrons ici que, dans un certain régime, les fonctions d'ondes se localisent en fait dans les bassins du potentiel effectif associé au paysage de localisation. En superposant les seuils de percolation de ce paysage aux valeurs du seuil de mobilité obtenues par analyse multifractale ou par la méthode des matrices de transfert [4], on observe que la percolation du potentiel effectif coïncide avec les branches latérales du seuil de mobilité dans le diagramme énergie-désordre [2]. Ceci suggère que la branche horizontale du seuil, au-dessus du désordre critique, correspond à un mécanisme différent de localisation. Cette conjecture est confortée par l'examen du diagramme pour un potentiel binaire : les frontières latérales et supérieure du seuil de mobilité sont alors séparées par une phase délocalisée pour toutes les valeurs de l'intensité du désordre.

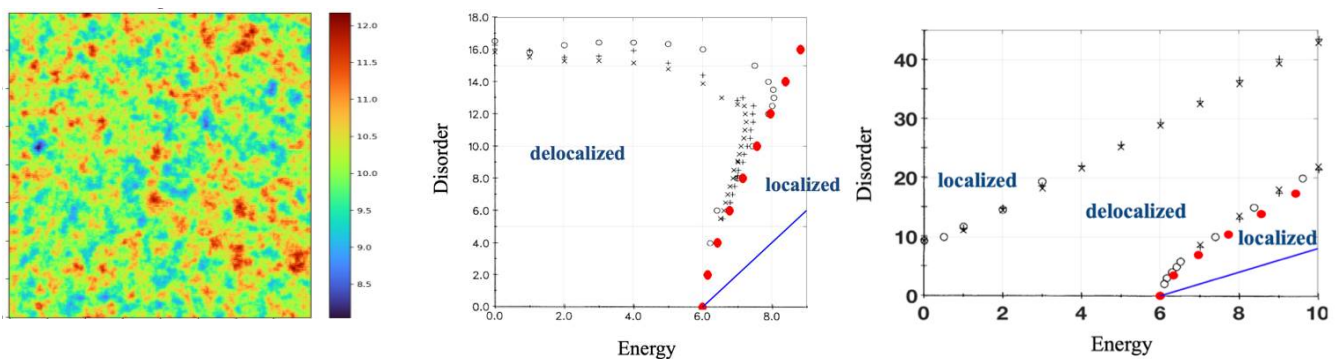


Figure 1 : (Gauche) Exemple de paysage de localisation calculé sur un réseau 2D. (Centre et droite) Seuils de mobilité obtenus pour un potentiel aléatoire uniforme (au centre) et binaire (à droite). Les points rouges représentant les seuils de percolation du potentiel effectif se superposent aux bords latéraux du seuil de mobilité déjà connus [4], suggérant que cette transition peut être comprise comme une transition de percolation du paysage

Bibliographie

- [1] M. Filoche and S. Mayboroda, “Universal mechanism for Anderson and weak localization,” *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **109**, 14761 (2012).
- [2] M. Filoche, P. Pelletier, D. Delande, S. Mayboroda, “Mobility edge as a percolation transition,” [arXiv:2309.03813](https://arxiv.org/abs/2309.03813) [cond-mat.dis-nn]
- [3] P.W. Anderson, “Absence of diffusion in certain random lattices,” *Phys. Rev.* **109**, 1492 (1958).
- [4] H. Grussbach and M. Schreiber, “Determination of the mobility edge in the Anderson model of localization in three dimensions by multifractal analysis,” *Phys Rev. B* **51** 663 (1995).

Quantification du poids des défauts et de la contamination dans les pertes par diffusion lumineuse des composants optiques hautes performances

A. Bolliand¹, M. Lequime¹, C. Amra¹ et M. Zerrad¹

¹ : Aix Marseille Univ, CNRS, Centrale Marseille, Institut Fresnel, Marseille, France
 adrien.bolliand@fresnel.fr

Résumé

Nous présentons ici un instrument original permettant de quantifier en les discriminants le poids de la contamination, des défauts localisés et de la rugosité des surfaces dans les bilans de pertes par diffusion lumineuse.

1. Introduction

Certains systèmes optiques requièrent des composants de très haute qualité avec très peu de pertes. C'est par exemple le cas des détecteurs d'ondes gravitationnelles, des charges utiles optiques embarquées sur les satellites ou du laser Mégajoule. Pour chacune de ces applications, les pertes induites par la présence de défauts localisés et/ou de contamination à la surface des composants sont une limitation majeure des performances, et il n'existe à l'heure actuelle, aucun moyen de quantifier leur effet sur les bilans de pertes. C'est dans ce contexte que l'instrument SPARSE (*SPATIally Resolved Scatterometry Equipment* – Diffusomètre spatialement résolu) a été conçu et développé.

2. Principe de l'instrument

SPARSE est un instrument qui associe les principes d'un diffusomètre, ie, une mesure absolue et angulairement résolue de faibles flux optiques ou BRDF (*Bidirectionnal Reflectance Distribution Function*) à un système imageur pour acquérir une mesure spatialement résolue de la BRDF. Un schéma de principe de l'instrument est donné Figure 1. Dans sa configuration actuelle, l'instrument SPARSE permet de caractériser en une unique acquisition un échantillon de 25 mm de diamètre par la mesure indépendante et simultanée de 400 000 BRDF correspondant à autant de microsursfaces de 26µm x 26µm. Compte tenu du grand nombre de données à considérer pour l'analyse d'un échantillon, le traitement des données nécessite le développement d'outils dédiés qui s'appuient sur les modèles physiques. L'enjeu est ici d'identifier les différents types de défauts (défauts localisés, contamination, rayures) en les discriminant, mais également en quantifiant leurs dimensions et les pertes par diffusion qu'ils génèrent.

3. Caractérisation d'un échantillon « abimé »

On peut voir en Figure 2, un exemple de mesure réalisée sur un miroir volontairement rayé pour illustrer la capacité de mesure. Pour chaque microsursface de 26 µm x 26 µm, la courbe de diffusion angulaire est enregistrée. L'affichage de la diffusion totale intégrée (TIS – *Total Integrated Scattering*) sur la cartographie de gauche permet une visualisation synthétique des niveaux de diffusion. On peut voir sur les courbes de droite des exemples de mesures locales sur des zones avec et sans défauts comparées au niveau global des pertes

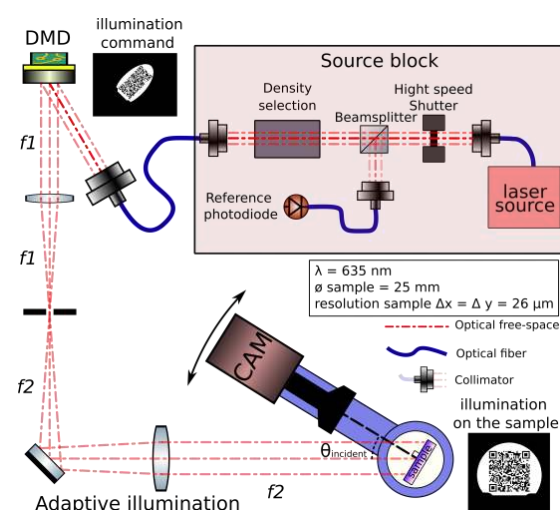


Figure 1 Schéma de principe du diffusomètre SPARSE

par diffusion de l'ensemble du composant. La comparaison entre les courbes donnent un ordre de grandeur du poids des défauts en regard de celui de la rugosité.

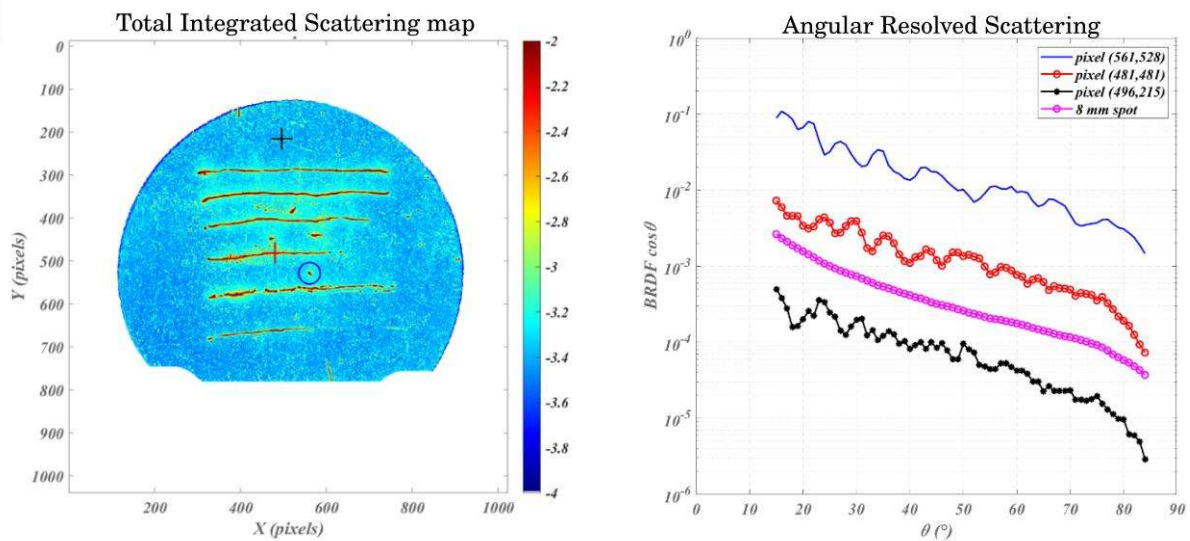


Figure 2 Représentation du TIS (Total Integrated Scattering) d'un échantillon rayé (gauche) et indicatrices de diffusion des microsursfaces marquées par des croix et d'un spot de 8 mm de rayon sur la surface de l'échantillon.

4. Conclusion et perspectives

Les capacités de mesure de l'instrument SPARSE en font un outil unique au monde pour l'analyse quantitative des surfaces optiques. Le grand nombre de données accessibles permet des études statistiques avec peu de mesures. La possibilité de discriminer les différents types de défauts, ainsi que leur réponse angulaire en termes de diffusion lumineuse, autorise désormais une analyse critique des normes de qualité de surface des composants optiques. Des évolutions sont également en cours pour étendre la gamme spectrale accessible par l'instrument SPARSE.

5. Remerciements

Ce travail est l'objet d'une thèse co-financée par Thales Alenia Space et le CEA dans le cadre du LoLAH. Le matériel bénéficie du plan d'investissement "France 2030" géré par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR-21-ESRE-0002). (ANR-21-ESRE-0002) / EQUIPEX IDEC. SPARSE bénéficie des moyens de la plateforme DIFFUSIF (fresnel.fr/diffusif).

6. Bibliographie

- [1] Amra C, Lequime M., Zerrad M, *Electromagnetic optics of thin-film coating*, Cambridge university press, Marseille, 2021.
- [2] Lequime M, Zerrad M, Deumié C, Amra C, A goniometric light scattering instrument with high-resolution imaging, *Optics communication*, vol. **282**, pp. 1265-1273, 2009.
- [3] A. Bolliand, E. Hartmann, M. Lequime, M. Zerrad, and C. Amra, "A new spatially and angularly resolved scatterometer," in Optical Interference Coatings Conference (OIC) 2022.
- [4] A. Bolliand M. Lequime, C. Amra and M. Zerrad- Spatially Resolved light scattering metrology for a quantitative analyse of contamination weight in optical components performances - Paper in progress.

Architecture laser semiconducteur versatile pour excursions en fréquences rapides et précises

T.Llauze, A.Louchet-Chauvet
Institut Langevin, CNRS – ESCPI, Paris 75005

Résumé

Nous présentons notre travail sur le développement d'un laser agile en fréquence. Ce laser s'appuie sur une architecture de correction multi-étage permettant la génération d'excursions en fréquence rapides et précises ainsi que l'asservissement du laser à fréquence fixe. L'agilité du laser est évaluée avec des excursions en fréquence triangulaires de l'ordre du GHz/ μ s.

1. Introduction

La modulation rapide et précise de la fréquence d'un laser, ou « agilité en fréquence » est une capacité clé dans de nombreux domaines comme les lidars FMCW [1], télécoms [2] ou applications quantiques [3]. Diverses solutions combinant agilité en fréquence et faible largeur de raie sont déjà disponibles : les lasers à cavité étendues et les lasers DBR proposent tous deux une bonne linéarité ainsi qu'un faible bruit mais sont limités en termes de fréquence de modulation sous le MHz [4]. Les circuits photoniques intégrés sur silicium permettent de dépasser cette limitation en fréquence de modulation mais souffrent cependant d'une importante non-linéarité dépassant 1% [5].

Nous présentons un laser agile basé sur une architecture de correction multi-étage permettant de réaliser des excursions en fréquence arbitraires de l'ordre du GHz/ μ s pour une non-linéarité inférieure à 1% tout en offrant une largeur spectrale du laser à fréquence fixe de l'ordre de la dizaine de kHz.

2. Mesures et générations des excursions en fréquence

Les excursions en fréquences sont générées en modulant la fréquence d'un laser à semi-conducteur en faisant varier le courant de polarisation de la section de gain du laser. La fréquence instantanée du laser induite par cette consigne est entachée de diverses erreurs, reproductibles ou non, qu'il est nécessaire de corriger. L'architecture multi-étages que nous présentons ici permet d'adresser ces différents types d'erreur. Nous disposons d'un interféromètre de Mach-Zehnder (MZI) déséquilibré comprenant un décalage de fréquence dans l'un de ses bras. Un algorithme de déconvolution de Wiener permet d'extraire du signal de battement en sortie du MZI la fréquence instantanée du laser [6].

3. Pré-correction des erreurs systématiques sur la fréquence du laser

La réponse en fréquence du laser est déformée principalement par la réponse non-instantanée du laser. Elle est donnée par le produit de convolution de la commande de tension et de la réponse impulsionnelle du laser. Pour anticiper la déformation, on applique une commande précorrigée $V_{PC}(t)$ donnée par : $F^{-1}\left(\frac{C(f)}{H(f)}\right)$ $C(f)$ étant la transformée de Fourier de l'excursion de fréquence souhaitée $C(t)$ et F^{-1} l'opérateur de la transformée de Fourier inverse.

Bien que la précorrection réduise largement l'erreur en fréquence, des erreurs reproductibles résiduelles subsistent en raison des non-linéarités du laser. Ces erreurs sont corrigées avec une méthode itérative [6]. On modifie la commande en lui appliquant une petite correction déduite de l'erreur de fréquence mesurée précédemment.

4. Correction active des excursions en fréquence

Une fois que les erreurs reproductibles sont efficacement supprimées, il ne reste que des erreurs non-reproductibles, provenant principalement du bruit de fréquence du laser. Pour les corriger nous exploitons le signal de battement recueilli en sortie du MZI permettant de générer un signal d'erreur proportionnel au décalage de fréquence. Une première boucle d'asservissement analogue à une boucle à verrouillage de

phase (PLL) permet une réduction des erreurs jusqu'à 600 kHz environ. Un oscillateur local arbitraire est utilisé pour permettre des excursions arbitraires [7].

Pour dépasser la bande-passante de la PLL, nous ajoutons une correction en feedforward. Cette dernière consiste à appliquer une correction à l'émission laser a posteriori. et repose sur l'utilisation d'un modulateur de phase placé sur le chemin du laser après une ligne à retard de longueur bien choisie. La combinaison de ces deux étapes fournit une correction polyvalente capable de traiter des commandes de fréquence arbitraires, incluant des balayages rapides et un fonctionnement à fréquence fixe du laser.

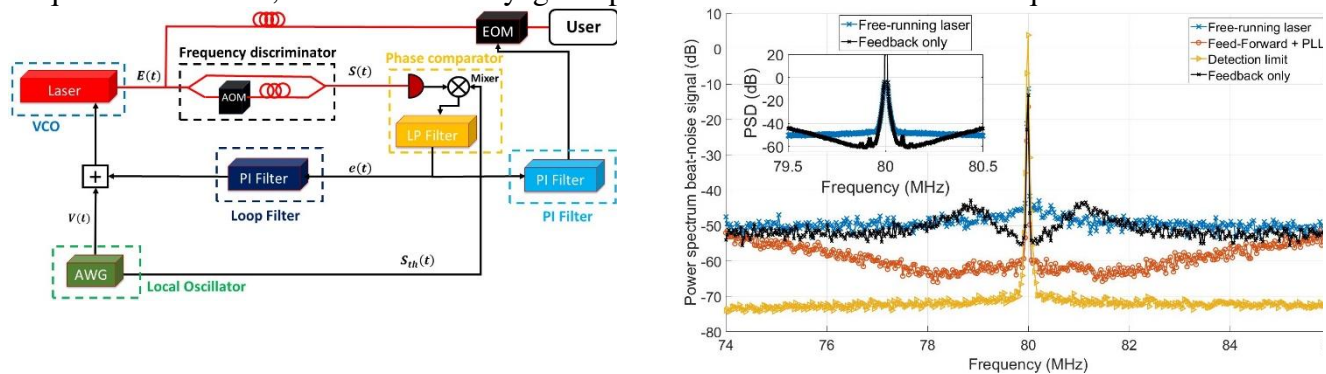


Figure 3. Gauche : Schéma du montage. Droite : Spectre du signal de battement (autour de 80MHz) sans correction (bleu), avec correction PLL (noir), et avec correction PLL et feed-forward combinées (orange).

Les performances de notre architecture complète sont testées pour des excursions triangulaires à différentes fréquences de modulation jusqu'à 1,5 MHz. Un bilan est donné dans le tableau 1.

Fréquence de modulation	Amplitude chirps	Erreur RMS	Non-linearité (%)
25 kHz	1000 MHz	2.04 MHz	0.2
100 kHz	800 MHz	1.62 MHz	0.2
1500 kHz	240 MHz	2.04 MHz	0.85

Tableau 1 : Caractéristiques de différentes excursions en fréquence triangulaire après application de notre architecture multi-étage

5. Conclusion

Notre architecture de correction multi-étage, basée sur la correction successive des erreurs systématiques et stochastiques de la fréquence instantanée d'un laser, permet d'obtenir une source agile en fréquence, capable d'effectuer des balayages rapides et précis de l'ordre du GHz/ μ s.

6. Bibliographie

- [1] Iskander G. et al., Low pixel count imaging FMCW lidar, *Appl. Opt.*, vol. **61**, 9241-9246. 31-Nov, 2022.
- [2] Kranendonk, L A et al, Modeless operation of a wavelength agile laser by high-speed cavity length changes, *Optics Express*, vol **13**, 1498—1507. 5, 2005
- [3] Kinoshita, A. et al, Roadmap for rare-earth quantum computing, *arXiv preprint arXiv:2103.15743*, 2013
- [4] Crozatier V. et al, Phase locking of a frequency agile laser, *Appl. Phys. Lett.*, vol **89**, 26, 2006
- [5] Lihachev, G. et al, Low-noise frequency-agile photonic integrated lasers for coherent ranging, *Nat. Comm.*, vol **13**, 3522. 1, 2022
- [6] Ahn, T. et al, Analysis of nonlinear frequency sweep in high-speed tunable laser sources using a self-homodyne measurement and Hilbert transformation, *Appl Opt*, vol **46**, 2394—2400. 13, 2007
- [7] Kervella, G. et al, Laser sources for microwave to millimeter-wave applications, *Photonics Research*, .vol **2**, B70--B79. 4, 2014
- [8] Satyan, N et al, Precise control of broadband frequency chirps using optoelectronic feedback, *Opt Exp*, vol 17, 15991—15999. 18, 2009

Imagerie en polarimétrie de Mueller pour améliorer l'exploration optique des tissus durant les chirurgies

A. Courilleau¹, J.C. Vanel¹, A. Pierangelo¹

¹ : LPICM, UMR 7647 CNRS, Ecole Polytechnique, Institut Polytechnique de Paris, route de Saclay, 91128 Palaiseau, France

aymeric.courilleau@polytechnique.edu

Résumé

Nous présentons les résultats préliminaires quant au développement instrumental et à l'étude de modèles de l'imagerie en polarimétrie de Mueller (IPM) appliquée à des problématiques médicales telles que la détection de lésions précancéreuses. L'application présentée en exemple un protocole conjoint à l'INRAE, l'Hopital du Kremlin Bicêtre, le LMS et le LPICM. Le but est d'étudier les propriétés opto-mécaniques de tissus cicatriciels pour améliorer la compréhension et la prévention des risques de grossesses post-césariennes.

1. Introduction

Des travaux récents illustrent l'intérêt et la pertinence de ce type d'imagerie dans le milieu médical, en particulier pour les détections de variations de structures cellulaires occasionnées par des lésions précancéreuses. Une étude clinique de mesures polarimétriques des cancers de la trachée a été réalisée par D.Elson & Al [1]. Schnellendorfer, Thomas, et al développent un dispositif d'IPM partiel endoscopique [2] en vue d'application chirurgicales. Enfin, une application colposcopique en IPM complète a démontré un fort progrès de la détection de cancers du col utérin [3]. Nous travaillons sur l'étude théorique des principes physiques et sur le développement instrumental de dispositifs d'imagerie en vue d'explorer les différentes informations structurelles rendues accessibles par l'IPM. En particulier, nous nous sommes intéressés à l'étude des variations des propriétés polarimétriques d'utérus de lapines avec et sans césarienne, pour améliorer la compréhension et la prévention des risques de grossesses post-césariennes.

2. Instrumentation et interprétation de l'IPM

Le polarimètre de Mueller permettant l'acquisition d'images macroscopiques est présenté en Figure 1.

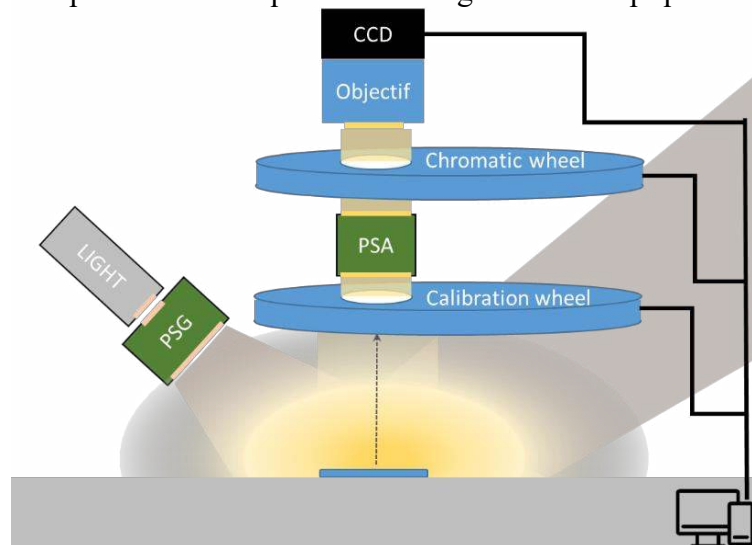


Figure 1. Schéma du macroscopie polarimétrique ; une source xénon illumine le porte échantillon au travers du générateur d'états de polarisations (PSG) ; l'échantillon est imagé au travers l'analyseur d'états de polarisation (PSA) sur une caméra CCD. La surface de vue dans le plan de l'échantillon : de 3.2x3.2 mm² à 4x4 cm², et l'imagerie est réalisée en diffusion.

Cet instrument permet l'étude des propriétés polarimétriques de différents échantillons en diffusion. L'échantillon est illuminé par des états de polarisations à l'aide d'un PSG (*polarisation state generator*) et d'une source de lumière blanche incohérente. L'échantillon ainsi illuminé est imagé sur une caméra CCD après filtrage de la bande de longueur d'onde d'intérêt et pour chaque état de polarisation sortant du le PSA (*polarisation state analyzer*). Ainsi pour chaque pixel de l'image, nous pouvons reconstruire la matrice de Mueller. Par décomposition de cette matrice, comme celle de Lu & Chipman directe, nous séparons les différents effets optiques de dépolarisation, de retardance, et de diatténuation. Un scalaire est calculé sur la base de chacune des matrices associées à chacun de ses effets optiques pour reconstruire une image. Ces scalaires deviennent les valeurs des pixels de ces nouvelles images ainsi extraites.

3. Exemple applicatif d'étude de tissus biologiques

Nous présentons en exemple la comparaison d'images d'intensité avec des images de dépolarisation d'échantillons d'utérus de lapine mesurés du côté muqueux (interne à l'utérus) à l'aide du dispositif d'IMP macroscopique (Figure 1) dans la Figure 2.

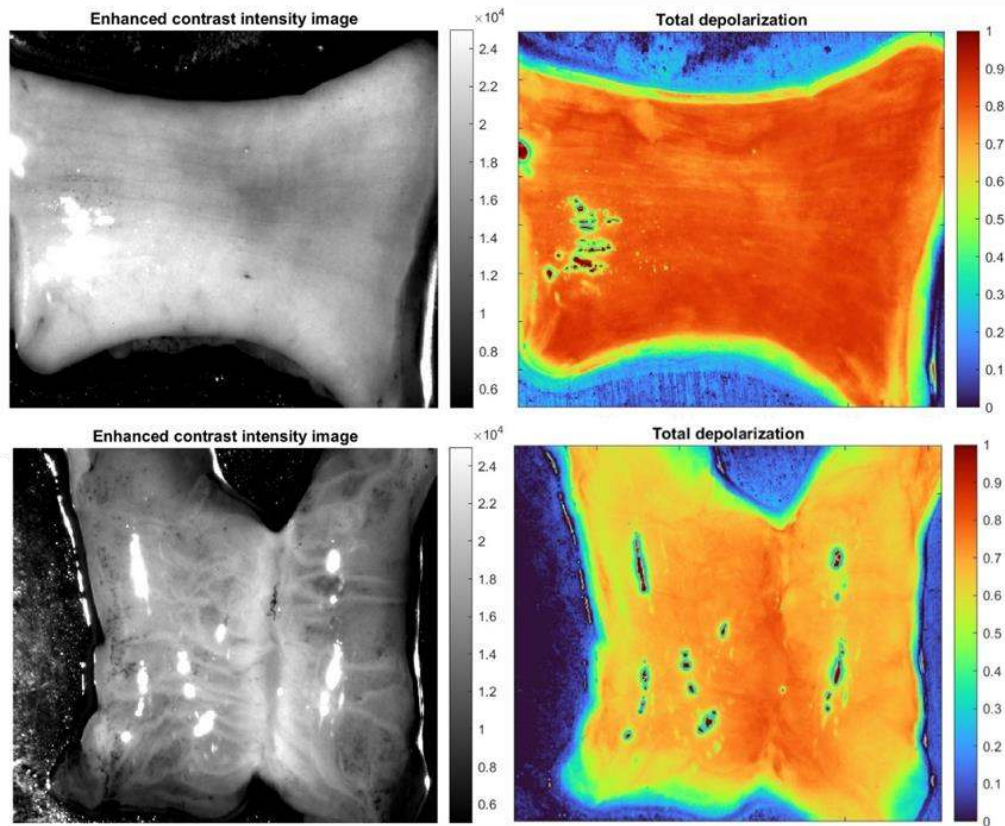


Figure 2. Comparaison des signaux portés par les images d'intensité et les images en dépolarisation d'échantillons d'utérus de lapines présentant une cicatrice et n'en présentant pas. la première colonne présente les images d'intensité sur la même échelle d'intensité ; la deuxième colonne présente les images des effets de dépolarisation des échantillons de référence et cicatriciels. La première ligne correspond aux images de tissus de références (sans césarienne), la seconde ligne correspond à celles du tissu cicatriciel (avec césarienne). Longueur d'onde : 550nm, champ de vue : 4 cm², temps d'intégration : 30 ms.

Sur les images de la première colonne, le tissu présente de fortes différences. Notamment, nous observons l'apparition de nombreuses structures biologiques blanches ; tout de fois il est difficile d'isoler la zone spécifique à la cicatrice. Dans la seconde colonne, les tissus présentent des différences fortes mais la zone de la cicatrice est bien plus conscrîte et isolée.

4. Conclusion

Dans cette contribution, nous avons montré l'intérêt de l'IPM dans l'étude des processus de cicatrisation d'organes tels que l'utérus en vue de compléter l'observation en intensité, et de faciliter l'identification des zones cicatricielles des autres zones et ce sur l'observation de différents paramètres polarimétriques. Cette étude, corrélée à l'étude des propriétés mécaniques de ces tissus, ont pour but de permettre la construire des indicateurs de risques ou non de rupture lors de grossesses post-césarienne.

5. Remerciements

Les auteurs remercient l'IRAE, Elodie Débras, le CHU Bicêtre et l'IMM. Martin Foldyna pour les corrections

6. Bibliographie

- [1] Qi, Ji, et al. "Surgical polarimetric endoscopy for the detection of laryngeal cancer." *Nature biomedical engineering* (2023): 1-15.
- [2] Schnelldorfer, Thomas, et al. "Evaluation of a polarization-enhanced laparoscopy prototype for improved intra-operative visualization of peritoneal metastases." *Scientific Reports* 13.1 (2023): 14892.
- [3] Park, Junha, et al. "Cervical cancer diagnostics with a multispectral Mueller polarimetric colposcope." *European Conference on Biomedical Optics*. Optica Publishing Group, 2019.
- [4] Lu, Shih-Yau, and Russell A. Chipman. "Interpretation of Mueller matrices based on polar decomposition." *JOSA A* 13.5 (1996): 1106-1113.

Poster : Shaping evanescent waves for optogenetic activation of live cells

Marc GROSJEAN¹, Irène WANG¹, Antoine DELON¹, Olivier
DESTAING², Alexei GRICHINE², and Mylene PEZET²

¹Univ. Grenoble Alpes, CNRS, LIPhy, F-38000 Grenoble, France ,
²Institute for advanced biosciences (IAB), UGA, CNRS, Inserm ,
France ,

Decembre 2023

Optogenetics is a powerful technique for understanding cellular processes *in vivo*. The wide variety of proteins, which conformation and/or affinities can easily be controlled by light, makes this technique very relevant for the study of cell signalling.

The possibility to precisely tune the spatial and temporal properties of proteins activity is the major promise of optogenetics. This would require a precise control in 3D of the activating light distribution, which is not easily achieved. Today, light can be patterned with micrometric accuracy, but only in a plane transverse to its propagation axis, while it remains unconstrained along this axis. In contrast, total internal reflection fluorescence (TIRF) microscopy uses an evanescent field to confine light in depth, but does not provide transverse patterning in the sample plane.

Here, we present a method to combine transverse and axial illumination confinement: evanescent wave patterning. Our approach is based on wavefront-shaping using a digital micro-mirror device (DMD). We discuss the minimum size of an evanescent pattern that the setup can produce. We show multiple evanescent patterns on a fluorescent solution. We also discuss the applications of our method to limit the diffusion of proteins photoactivated in a subregion of a cell.

Liste des participants

- Aarab Youssef
- Abautret Yannick
- Abdeddaim Redha
- Abel-Tiberini Laetitia
- Achalhi Kamal
- Aftis Sarah
- Ahmad Youssef
- Aleman Castaneda Luis Arturo
- Allard Valentin
- Allard Valentin
- Alves Thierry
- Andrieu Guillaume
- Ans Simon
- Anterrieu Eric
- Artaud Noan
- Banon Jean-Philippe
- Barouki Sami
- Barthélémy Fanny
- Belhocine Linda
- Bellion Anthony
- Bellis Cédric
- Ben Soltane Isam
- Benachir Assia
- Bennet Pauline
- Bernard Monique

- Besbes Mondher
- Bolliand Adrien
- Bonod Nicolas
- Bouchet Dorian
- Brancato Samia
- Brasselet Sophie
- Brosseau-Habert Nicolas
- Brunet Elena
- Burokur Shah Nawaz
- Carrez Alexandra
- Carvalho Camille
- Castagnet Nicolas
- Cavaliere Théo
- Chabassier Juliette
- Chaigne Thomas
- Chaillat Stéphanie
- Chanvillard Lucas
- Chrysa Vourdaki
- Combacau Olivier
- Coudrat Laure
- Courilleau Aymeric
- Croquette Samuel
- Crunteanu Aurelian
- Cai Yudong
- Dagens Béatrice
- Davy Matthieu
- De Fornel Frédérique
- De Leon Lazaro Javier
- De Rochefort Ludovic
- Debarbieux Franck
- Degiron Aloyse
- Delhote Nicolas

- Delon Antoine
- Dienot Jean-Marc
- Dinh Trung-Tin
- Dolabdjian Christophe
- Doré Jean-Baptiste
- Dubois Marc
- Dubois Tristan
- Dufaure Astrid
- Dufour Nina
- Duguet Antoine
- Dujardin Erik
- Ekon Ayawo
- Enoch Stefan
- Escobar Ana Cristina
- Eudes Thomas
- Ezzeddine Hussein
- Fade Julien
- Fantuzzi Eric Michele
- Fehrembach Anne-Laure
- Fernandez Samantha
- Ferrand Patrick
- Flourens Franck
- Fond Emilie
- Franceschini Emilie
- Fromenteze Thomas
- Fromenteze Thomas
- Galland Frédéric
- Gallas Bruno
- Garabetian Diana
- Gauthier-Lafaye Olivier
- Geffrin Jean-Michel
- Gérard Davy

- Gieraltowski Jacek
- Goudail François
- Gralak Boris
- Grand Clément
- Grosjean Marc
- Guedj Eric
- Guene Claire
- Guiffaut Christophe
- Guillaume Demesy
- Hamard Baptiste
- Hartmann Edith
- He Puyuan
- Henry Gérard
- Herbuvaux Jules
- Heuke Sandro
- Hijazi Lara
- Hillairet Julien
- Hoffmann Patrick
- Hugo Amat
- Itier Jérémy
- Jacquet Quentin
- Jaoui Rachid
- Jia Xiaoping
- Kalt Victor
- Kamal Inass
- Khan Imran
- Lafond Olivier
- Laquerbe Vincent
- Lasaygues Philippe
- Latil Nino
- Laude Vincent
- Lavoute Cecile

- Le Bihan Soazig
- Le Thuc Philippe
- Legrand Maud
- Lemarchand Alice
- Lereu Aude
- Leroy Valentin
- Lesselier Dominique
- Lévy Pierre-Etienne
- Lheurette Eric
- Litman Amelie
- Llauze Thomas
- Lombardini Alberto
- Lopez Tanguy
- Louchet-Chauvet Anne
- Lumeau Julien
- Maximilian Lengauer
- Macias Demetrio
- Mailfert Sébastien
- Mansouri Yahiaoui Aya
- Many Manda Bertin
- Many Manda Bertin
- Martin Sandra
- Martin Ines
- Maurel Agnès
- Maystre Daniel
- Mazé-Merceur Geneviève
- Mazzella Lorry
- Metais Samuel
- Miradji Faoulat
- Moknache Amazir
- Monmayrant Antoine
- Namazzade Nigar

- Nguyen Pascal
- Nicolet André
- Noël Valentin
- Paillet Léo
- Pereira Déborah
- Peres Bastien
- Perraud Richard
- Petite Camille
- Pham Kim
- Piau Gerard-Pascal
- Pichon Lionel
- Picon Thomas
- Pierrat Romain
- Pouliguen Philippe
- Prestaux David
- Refregier Philippe
- Renkanga Mbatchi Wilfrid
- Renversez Gilles
- Rescanieres Romain
- Rigneault Herve
- Rosado Lorenzo
- Rousseau Emmanuel
- Rouxel Antoine
- Roy Mahé
- Sabouroux Pierre
- Samara Elio
- Sanner Nicolas
- Savin Eric
- Seddighi Mohsen
- Seetharamdoo Divitha
- Sentenac Anne
- Serpaud Sébastien

- Sierra Velez Julian
- Sifoune Sarah
- Soriano Gabriel
- Stout Brian
- Suresh Sisira
- Tchernycheva Maria
- Thullier François
- Tishkova Victoria
- Tortel Hervé
- Toumi Yousra
- Tourin Arnaud
- Trouvé-Peloux Pauline
- Vanzetta Ivo
- Vena Arnaud
- Vernuccio Federico
- Vial Benjamin
- Vincent Didier
- Vrech Margaux
- Weber Antoine
- Wojak Julien
- Wu Long-Fei
- Zaccaron Michele
- Zamkotsian Frédéric
- Zerrad Myriam
- Zhang Jingwen

Liste des auteurs

- Abautret Yannick, 86–88
Ahmad Youssef, 104–106, 109, 110
Alexandre Baron, 89–91
Allain Marc, 161, 162
Allard Valentin, 81, 82
Alves Thierry, 127, 128
Amra Claude, 49, 50, 62, 63, 86–88, 116, 117, 168, 169
Andrieu Guillaume, 21, 136
André Rémi, 109, 110
Ans Simon, 38, 39
Anterrieu Eric, 11
Appay Romain, 109, 110
Aspect Alain, 64, 65
Assier Raphael, 55, 56
- Bailly Rodolphe, 4
Banon Jean-Philippe, 64, 65
Baron Cécile, 94, 95
Barouki Sami, 155, 156
Begueret Jean-Baptiste, 142–144
Bellion Anthony, 31
Ben Soltane Isam, 44, 45
Bennet Pauline, 41, 42
Besbes Mondher, 66, 67
Bolliand Adrien, 116, 117, 168, 169
Bonod Nicolas, 44, 45
Bossy Emmanuel, 78
Bouchet Dorian, 78
Boyer Alexandre, 145–147
Brosseau-Habert Nicolas, 51, 52
Burokur Shah Nawaz, 121, 122
Burokur Shah-Nawaz, 74, 75
Bux Simone, 83, 84
- Cabaret Jérémy, 4
Cahuzac Stéphane, 119, 120
Carvalho Camille, 3
Castagnet Nicolas, 145–147
Cavaleri Théo, 35–37
Cecconi Cécile, 4
Centeno Emmanuel, 40
Centeno, Emmanuel, 43
Chabassier Juliette, 4
Chamard Jean-Christophe, 35–37
Champagnat Frederic, 12, 13
Cherroret Nicolas, 64, 65
Claudon Julien, 92
Coudrat Laure, 92
Courilleau Aymeric, 172, 173
Coutin Steven, 157, 158
- Croquette Samuel, 107, 108
Crunteanu Aurelian, 125, 126
Curtit Marthe, 4
- Davy Matthieu, 26, 27
De Angelis Costantino, 92
De Ceglia Domenico, 92
De Kat Jean, 68–70
De Leon Lazaro Javier, 109, 110
De Rosny Julien, 59–61
Decroze Cyril, 125, 126
Degiron Aloyse, 85, 92
Delande Dominique, 64, 65
Delhote Nicolas, 17
Delory Alexandre, 107, 108
Demésy Guillaume, 38, 39, 46–48, 79, 80
Devel Michel, 51, 52
Dienot Jean-Marc, 157, 158
Dierick Félice, 44, 45
Dinh Trung-Tin, 100, 101
Dolabdjian Christophe, 14
Dollet Benjamin, 78
Doré Jean-Baptiste, 16
Doveri Elise, 94, 95
Druart Guillaume, 12, 13
Dubois Tristan, 134, 135, 140–144
Duchamp Geneviève, 134, 135, 140, 141
Dufour Nina, 114, 115
Dufraisse Marius, 12, 13
Duguet Antoine, 140, 141
Dujardin Erik, 8, 9
Dutrieux Sylvain, 119, 120
- El Abbazi Adil, 142–144
El Korso Mohammed Nabil, 121, 122
Emmanuel Lhuillier, 85
Ernoul Augustin, 4
Escudié Fabien, 145–147
Espinosa Luis, 94, 95
Ettorre Mauro, 62, 63
Ezzeddine Hussein, 59–61
- Fade Julien, 25
Fantuzzi Eric Michele, 96, 97
Favard Cyril, 79, 80

Filoche Marcel, 167
 Flourens Franck, 22, 23
 Fombonne Cyril, 33
 Forget Nicolas, 83, 84
 Freschi Fabio, 132, 133

 Galland Frédéric, 161, 162
 Gatti Marc, 142–144
 Gautier Cyrille, 150, 151
 Gavrilenko Veronika, 157, 158
 Giaccone Luca, 132, 133
 Giroussens Guillaume, 161, 162
 Goetschy Arthur, 165, 166
 Grand Clément, 102, 103
 Groby Jean Philippe, 35–37
 Grosjean Marc, 174
 Guenneau Sébastien, 55, 56
 Gérard Jean-Michel, 92

 Hamard Baptiste, 134, 135
 Hardy David, 140, 141
 He Puyuan, 85
 Heuke Sandro, 96, 97
 Hoffmann Patrick, 20, 155, 156
 Humbert Georges, 125, 126

 Idier Jerome, 12, 13, 161, 162
 Iglesias Martínez Julio Andrés, 72, 73

 Jacquet Quentin, 136
 Jia Xiaoping, 160
 Josse Vincent, 64, 65
 Jossic Marguerite, 4

 Kadic Muamer, 72, 73
 Kalaagi Mohammed, 129, 130
 Kalt, Victor, 43
 Khaireh–Walieh Abdourahman, 41, 42
 Khan Imran, 116, 117
 Kirsch Sebastian, 4
 Klingler Marco, 134, 135
 Koc Cihan, 79, 80
 Konan Hermann, 94, 95
 Krol Hélène, 49, 50

 Labouesse Simon, 161, 162
 Labrousse Denis, 150, 151
 Lagouanelle Paul, 132, 133
 Lambert Elsa, 4
 Langevin Denis, 41, 42
 Lasaygues Philippe, 94, 95
 Laude Vincent, 72, 73
 Le Bihan Soazig, 142–144
 Le Conte Sandie, 4

 Lefki Mariem, 152–154
 Legoff Loic, 161, 162
 Lemarchand Fabien, 79, 80
 Lemaître-Auger Pierre, 123, 124
 Lemoult Fabrice, 107, 108
 Leo Giuseppe, 92
 Lepetit Thomas, 74, 75
 Lequime Michel, 116, 117, 168, 169
 Lereu Aude, 79, 80
 Leroy Rémi, 12, 13
 Leroy Valentin, 6
 Lesselier Dominique, 111–113
 Llauze Thomas, 170, 171
 Lopez Tanguy, 74, 75
 Louchet-Chauvet Anne, 170, 171
 Louertani Karim, 33
 Lumeau Julien, 79, 80
 Lévy Pierre-Etienne, 150, 151

 Macias Demetrio, 2, 53, 54
 Mangeat Thomas, 161, 162
 Marmottant Philippe, 78
 Martin Ines, 83, 84
 Martins Carla, 161, 162
 Matthieu Bertrand, 62, 63
 Mazzella Lorry, 161, 162
 Meftah Nawel, 121, 122
 Melon Manuel, 35–37
 Miradji Faoulat, 51, 52
 Moknache Amazir, 32
 Monteiller Vadim, 94, 95
 Moreau Antoine, 41, 42
 Moreau Antonin, 79, 80
 Mouttou Anita, 79, 80
 Muriaux Delphine, 79, 80
 Métais Samuel, 83, 84

 Namazzade Nigar, 89–91
 Naudi Stéphane, 119, 120
 NoËl Valentin, 111–113

 Ourir Abdelwaheb, 59–61

 Paillet Léo, 163, 164
 Paschaloudis Konstantinos, 62, 63
 Peres Bastien, 123, 124
 Perraud Richard, 137–139
 Petre Anca, 157, 158
 Picaud Sylvain, 51, 52
 Pichon Lionel, 132, 133
 Pierrat Romain, 165, 166
 Pimenta Ravel, 62, 63
 Prada Claire, 107, 108

Prodan Emil, 72, 73
 Rammal Youssef, 136
 Ramos Ioav, 157, 158
 Ratni Badreddine, 74, 75, 121, 122
 Renkanga Mbatchi Wilfrid, 125, 126
 Renversez Gilles, 46–48
 Rescanieres Romain, 165, 166
 Revol Bertrand, 150, 151
 Rigneault Hervé, 83, 84, 96, 97, 109, 110
 Rodet Thomas, 111–113
 Rogez Benoit, 161, 162
 Roland Iannis, 92
 Romero-Garcia Vicent, 35–37
 Rouxel Antoine, 76, 77
 Ruscassié Robert, 157, 158
 Régine Guillermin, 94, 95

 Saadaoui Mehdi, 161, 162
 Salvador Franck, 140, 141
 Savin Eric, 57, 58
 Scalora Michael, 92
 Schwartz Fabien, 123, 124
 Seddighi Mohsen, 148, 149
 Seetharamdoo Divitha, 18, 129, 130
 Sentenac Anne, 96, 97, 161, 162
 Serpaud Sébastien, 137–139
 Sierra Velez Julian, 53, 54
 Sifoune Sarah, 150, 151
 Smaali Rafik, 40
 Smaali, Rafik, 43
 Soriano Gabriel, 62, 63
 Sorli Brice, 119, 120
 Staes Jonathan, 25
 Stephan Olivier, 78
 Stout Brian, 44, 45
 Suresh Sisira, 98, 99
 Sylvestre Thibaut, 83, 84

 Tanos Rana, 92
 Tchernycheva Maria, 7
 Teytaud Olivier, 41, 42
 Thullier François, 49, 50
 Touboul Marie, 55, 56
 Toumi Yousra, 79, 80
 Tourin Arnaud, 28, 29
 Trouvé-Peloux Pauline, 12, 13

 Van Baarsen Tobias, 4
 Vena Arnaud, 119, 120
 Vial Alexandre, 53, 54
 Vial Benjamin, 55, 56
 Viala Romain, 4

 Vincenti Maria Antonietta, 92
 Volatier Jean-Baptiste, 12, 13
 Vrech Margaux, 167
 Vuong Tan Phu, 123, 124

 Wiecha Peter, 41, 42
 Wojak Julien, 109, 110

 Zamkotsian Frédéric, 38, 39
 Zerrad Myriam, 49, 50, 62, 63, 86–88, 116, 117,
 168, 169

