

FAITS MARQUANTS 2019



INSTITUT
FRESNEL

*Institut Fresnel – UMR 7249 – Faculté des Sciences St-Jérôme
Avenue Escadrille Normandie-Niemen - 13013 Marseille - FRANCE*

www.fresnel.fr

Cartographier le transfert d'énergie entre dipôles dans une cavité optique

Les cavités optiques permettent d'améliorer les interactions lumière-matière. Une nouvelle approche expérimentale et théorique étend l'étude aux domaines des radiofréquences avec une résolution sans précédent.

La lumière peut être piégée dans une cavité constituée de deux miroirs, concentrant ainsi l'intensité de la lumière et renforçant les interactions lumière-matière. Parmi les différentes applications de ces cavités photoniques, une grande attention a été récemment accordée à leur capacité à contrôler l'échange d'énergie entre des émetteurs quantiques tels que les atomes, les molécules et les boîtes quantiques. Cependant, les tentatives d'amélioration de ce transfert d'énergie ont été entravées par les difficultés expérimentales rencontrées pour contrôler les positions, les orientations et les spectres des émetteurs. Ici, nous caractérisons minutieusement le transfert d'énergie dipôle-dipôle à l'intérieur d'une cavité photonique et fournissons des règles de conception pour améliorer le rendement des applications dans les cavités optiques.

À l'échelle nanométrique, le transfert d'énergie entre deux éléments sensibles à la lumière est principalement régi par une interaction dipôle-dipôle décrite par un formalisme mathématique connu sous le nom de transfert d'énergie de résonance de Förster (FRET). Nous avons développé une méthodologie générale pour analyser le FRET dans le domaine des radiofréquences. Alors que les recherches précédentes étaient axées sur les fréquences optiques, les expériences dans le régime micro-onde nous permettent de mesurer le transfert d'énergie avec un degré élevé de contrôle sur l'orientation et la position des dipôles. Nous appliquons ensuite notre méthodologie en étudiant le transfert d'énergie entre deux antennes à l'intérieur d'une cavité photonique et nous en déduisons les conditions qui améliorent le transfert.

Cette approche inédite jette un pont entre l'électrodynamique quantique et l'ingénierie micro-onde des interactions dipôle-dipôle. Au-delà de l'intérêt conceptuel, cette méthodologie fournit un outil pratique pour caractériser quantitativement des dispositifs photoniques avec une interaction dipolaire améliorée et peut être facilement appliquée pour cartographier le transfert d'énergie à l'intérieur de systèmes photoniques complexes à très haute résolution.

Cette recherche a été réalisée dans le cadre du laboratoire international associé « ALPhFA : laboratoire associé de photonique franco-australien » et a été financée par le programme Horizon 2020 de recherche et innovation de l'Union européenne, au titre du contrat n° 736937, par l'Agence nationale de la Recherche (ANR) dans le cadre du contrat ANR-17-CE09-0026-01 et par l'initiative d'excellence de l'Université d'Aix-Marseille - A* MIDEX du programme « Investissements d'Avenir ».

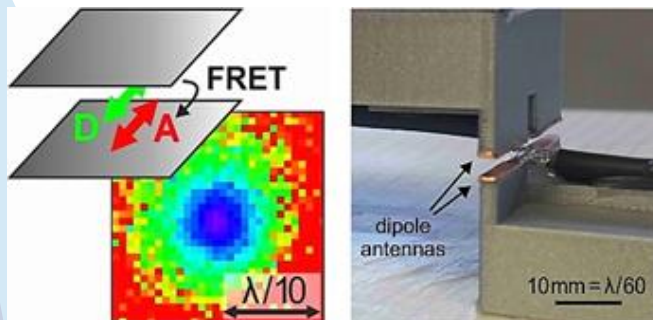


Figure : Cartographie du transfert d'énergie entre dipôles dans une cavité optique

Références : K. Rustomji, M. Dubois, B. Kuhlmeij, C. M. de Sterke, S. Enoch, R. Abdeddaim, J. Wenger ; *“Direct imaging of the energy transfer enhancement between two dipoles in a photonic cavity”* Physical Review X , mars 2019

Voir aussi l'article consacré à ces travaux à la Une du site internet de l'INSIS [« Une cartographie des transferts d'énergie dans les cavités optiques radiofréquences »](#)

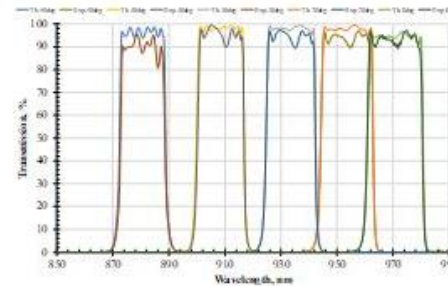
Contacts chercheurs :

Redha Abdeddaim, Stefan Enoch, équipe CLARTE
et Jérôme Wenger, équipe MOSAIC

Vers une collaboration académie/industrie toujours plus efficace

Filtres passe-bande angulairement accordables : design, fabrication et caractérisation

Les filtres à base de couches minces optiques offrent une large gamme d'applications allant de l'observation de la Terre à la biophotonique. Ils sont généralement des composants peu mis en avant dans les systèmes mais essentiels dans l'amélioration des performances des instruments optiques. Dans le cadre de récents travaux collaboratifs, l'équipe de recherche en couches minces optiques (RCMO) de l'Institut Fresnel et la société Bühler ont développé un nouveau filtre angulairement accordable pour le proche infrarouge. Ce filtre, composé d'environ 300 couches au total, a été conçu et fabriqué avec succès sur une machine Bühler HELIOS (pulvérisation cathodique magnétron réactive assistée par plasma) associée à un système de contrôle optique in-situ. Un système de caractérisation sur mesure a également été développée afin d'évaluer les performances de ce filtre optique complexe. Des performances proches de celles prédites par la théorie ont été démontrées. Ces résultats mettent en évidence non seulement la possibilité de développer des filtres toujours plus complexes au sein de la plateforme de l'Espace Photonique de l'Institut Fresnel, mais illustrent également une collaboration très fructueuse entre un laboratoire académique (Institut Fresnel) et un partenaire industriel (société Bühler) pour le développement de composants optiques de plus en plus performants.



Figures : Gauche - Performances spectrales en transmission mesurées et théoriques du filtre fabriqué
Droite - Illustration des filtres optiques interférentiels

Références : J. Lumeau, F. Lemarchand, T. Begou, D. Arhilger et H. Hagedorn ; "Angularly tunable bandpass filter : design, fabrication and characterization" *Optics Letters* 44(7), 1829-1832 (2019) – Editors' Pick

[Espace Photonique, Plateforme Technologique d'Aix Marseille Université](#)
[Notre partenaire BÜHLER](#)

Contact chercheur :

Julien Lumeau, équipe RCMO

Des résonateurs en céramique ouvrent de nouvelles perspectives pour la microscopie par résonance magnétique

La microscopie par résonance magnétique offre la possibilité d'imager des échantillons de quelques millimètres avec une résolution sub-micrométrique. Nous avons mis au point un nouveau type de sonde en matériau céramique permettant de réaliser des images avec des résolutions deux fois supérieures à celles obtenues avec des antennes classiques.

En microscopie par résonance magnétique (MRM), un domaine qui s'intéresse à l'imagerie d'échantillons de taille typique quelques millimètres, la sonde de référence pour produire une image est le solénoïde. Alimenté par un courant électrique, celui-ci produit un champ magnétique nécessaire à l'imagerie. Ce faisant, un champ électrique est également généré dans l'échantillon biologique, généralement doté d'une conductivité électrique non nulle, ce qui induit des pertes diélectriques, et par suite constitue une source de bruit. A durée d'acquisition fixée, ce phénomène limite intrinsèquement le rapport signal à bruit (RSB), et donc la résolution atteignable.

Dans ce contexte, plusieurs travaux de recherche ont évoqué et démontré le potentiel des sondes céramiques permettant de contourner cette limite à différentes intensités de champ magnétique statique B_0 . Le principe de ces sondes consiste à exploiter le premier mode transverse électrique d'un résonateur diélectrique de forme annulaire, excité à l'aide d'une simple boucle de courant. Ce mode a la particularité d'offrir un champ magnétique axial, similaire à celui de la sonde de référence, associé à un champ électrique négligeable.

Les propriétés de ce résonateur sont choisies afin que le mode d'intérêt résonne à une fréquence proche de celle de Larmor à l'intensité de champ statique considérée. A 17 T, le résonateur étudié devait être constitué d'une céramique de permittivité 530, tout en assurant un faible niveau de pertes au sein du matériau afin de ne pas ajouter de bruit lors de l'acquisition. Ces contraintes - haute permittivité et faibles pertes - ont pu être nuancées grâce à l'élaboration d'un nouveau matériau céramique ferroélectrique avec inclusions de magnésium.

Un modèle semi-analytique a été mis au point afin de proposer une estimation du RSB. Ceci a permis de comparer les performances de la sonde céramique avec la bobine de solénoïde de façon paramétrique en fonction des propriétés électromagnétiques du matériau ferroélectrique et de l'échantillon. Les simulations numériques ont permis de valider cette approche dans la configuration étudiée, également mise en pratique pour l'imagerie à 17 T d'un échantillon de houx.

Les mesures expérimentales ont confirmé les prédictions des études théorique et numérique, à savoir un gain en RSB de 2 de la sonde céramique sur la bobine de solénoïde. Ceci s'explique par l'interaction entre le champ électrique et l'échantillon, limitée dans le cas de la sonde céramique par la remarquable propriété du champ électrique d'être localement faible dans cette région.

Ces travaux ouvrent la voie à une nouvelle approche de développement des sondes de microscopie. La possibilité d'élaborer sur mesure les céramiques ferroélectriques permettent d'envisager un design optimisé de ces sondes. Pour un échantillon de dimensions et propriétés données, il serait possible de choisir entre la bobine de solénoïde ou une sonde céramique optimisée dans le but d'atteindre une résolution d'image la plus optimale possible.

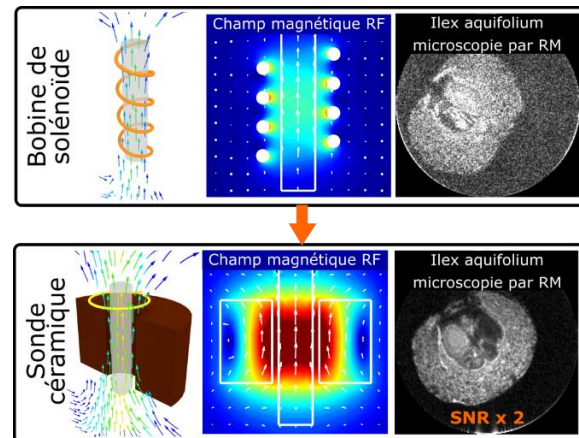
Références : M. A.C. Moussu, L. Ciobanu, S. Kurdjumov, E. Nenasheva, B. Djemai, M. Dubois, A. Webb, S. Enoch, P. Belov, R. Abdeddaim, S. Glybovski ; *"Systematic Analysis of the Improvements in Magnetic Resonance Microscopy with Ferroelectric Composite Ceramics"* accepted for publication in *Advanced Materials*

Version of Record online : 17 May 2019

<https://doi.org/10.1002/adma.201900912>

Contacts chercheurs :

M. Moussu, R. Abdeddaim, S. Enoch, équipe CLARTE

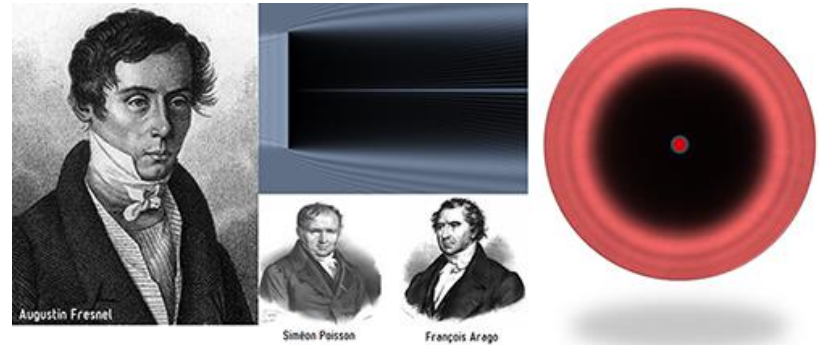


La tache d'Arago recrée temporellement dans une fibre optique

Bicentenaire des travaux d'Augustin Fresnel

Lorsque la lumière rencontre un obstacle sur son chemin, elle peut adopter un comportement incompatible avec les lois géométriques simples de la réflexion et de la réfraction. La théorie de la diffraction de la lumière énoncée par Augustin Fresnel constitue alors un tournant dans la compréhension fine du comportement paradoxal des ondes lumineuses. En 1819, son mémoire fondamental se voyait ainsi récompensé par le Grand Prix des sciences Mathématiques lancé par l'Académie des Sciences. Ses travaux ne firent pas immédiatement consensus et suscitèrent d'âpres débats notamment entre Siméon Poisson peu favorable à la vision de Fresnel et François Arago, physicien mais aussi futur premier ministre français. L'observation peu intuitive d'une tache brillante dans l'ombre d'un objet circulaire opaque permis de trancher définitivement en la faveur des idées avancées par Fresnel. Cette tache est restée dans l'histoire comme la tâche de Fresnel ou d'Arago.

Or la diffraction qui affecte le comportement spatial de l'onde lumineuse possède un équivalent temporel exact : la dispersion. Ainsi, lorsqu'une onde lumineuse rencontre un obstacle temporel, elle va manifester un comportement analogue à la diffraction. Nous avons pu mettre à profit cette dualité temps / espace dans plusieurs expériences réalisées dans les fibres optiques pour synthétiser des réseaux temporels à base de dispersion [1] ou encore pour réinterpréter dans le domaine temporel des phénomènes d'interférences comme ceux obtenus par Fresnel ou par Félix Billet, ancien doyen de la faculté des Sciences de Dijon [2]. Dans le cadre du bicentenaire du couronnement des travaux de Fresnel, un travail collaboratif entre l'Institut Fresnel et l'Institut interdisciplinaire Carnot de Bourgogne nous a permis de recréer, toujours grâce aux fibres optiques, l'analogue temporel de la tache d'Arago. En exploitant toutes les possibilités de caractérisations temporelles fines de la plateforme PICASSO du Laboratoire Interdisciplinaire CARNOT de Bourgogne, nous avons ainsi pu mettre en évidence l'émergence d'un pic lumineux là où initialement il n'y avait qu'obscurité [3]. Nous avons de plus souligné l'influence de la puissance lumineuse sur ces structures lumineuses.



Références : C. Finot et Hervé Rigneault

Journal of Optics 21, 105504 (2019)

[**Arago spot formation in the time domain**](#)

Contact chercheur :

Hervé Rigneault, équipe MOSAIC