

FAITS MARQUANTS 2021



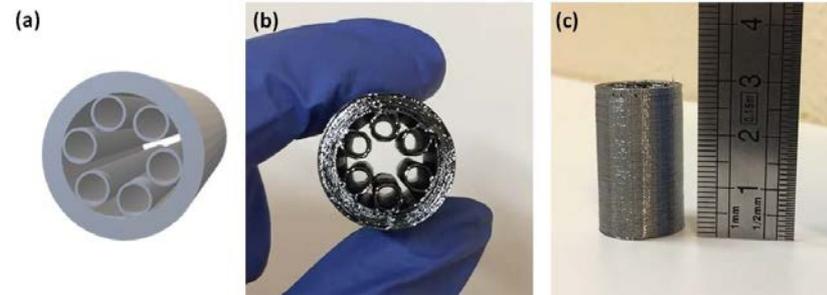
INSTITUT
FRESNEL

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

www.fresnel.fr

Première fabrication d'une fibre optique microstructurée en verre issue d'une préforme obtenue par impression 3D

Depuis la fabrication des premières fibres optiques microstructurées par Kaiser, Marcatili, et Miller in 1973, plusieurs techniques de fabrication de ces nouvelles fibres optiques ayant des sections transverses très variées ont été développées. C'est justement la grande variété possible de ces sections qui a permis le renforcement du contrôle de la propagation de la lumière dans ces nouvelles fibres. Si on se limite aux fibres en verres, on doit citer la plus connue et la plus utilisée des techniques de fabrication à savoir la méthode d'empilement et d'étirage, stack and draw and anglais, qui a permis de très nombreuses réalisations notamment à partir de verres de silice. Un autre exemple de technique est celle du moulage qui est utilisée surtout pour les verres spéciaux comme les verres de chalcogénure. Afin de permettre la fabrication de fibres avec des profils encore plus variés et donc d'obtenir un meilleur contrôle encore de la propagation de la lumière, il fallait pouvoir dépasser les limitations posées par les techniques actuellement disponibles. Pour atteindre cet objectif, une technique novatrice de fabrication par impression 3D de préforme de verres de chalcogénures a été développée. Elle a permis la fabrication d'une fibre optique microstructurée à coeur creux spécialement conçue pour l'infrarouge via la modélisation en tenant compte des contraintes de fabrication. Cette fibre a été caractérisée dans une large bande de l'infrarouge et les fenêtres de transmission observées sont correctement reproduites via l'utilisation de la théorie de modes couplés entre 7 et 9,6 μm . La conception et les modélisations des fibres ont été réalisées à l'Institut Fresnel via l'expertise acquises dans ce domaine depuis près de vingt ans. Ces travaux ouvrent la voie à la conception de nouveaux profils de fibres optiques microstructurées notamment en vue d'applications dans le domaine des capteurs, des lasers à fibres, et plus généralement du contrôle par fibre de la lumière dans l'infrarouge.



Figures : La préforme imprimée : (a) Vue schématique du design cible conçu à l'Institut Fresnel, chargée dans le logiciel de l'imprimante 3D customisée pour les verres de chalcogénures. (b) Section de la préforme de verre de chalcogénure TAS obtenue après l'impression 3D. (c) Vue de profil de la préforme réalisée avec une règle graduée pour l'échelle.

Références : J. Carcreff, F. Cheviré, E. Galdo, R. Lebullenger, A. Gautier, J.-L. Adam, D. Le Coq, L. Brilland, R. Chahal, G. Renversez et J. Troles ; "Mid-infrared hollow core fiber drawn from a 3D printed chalcogenide glass preform"

<https://doi.org/10.1364/OME.415090>

Contact chercheur :

Gilles Renversez, équipe ATHENA

La réalité cérébrale des symptômes du COVID long révélée en imagerie TEP métabolique

Dans le contexte de l'épidémie mondiale de COVID19, certains patients présentent des plaintes fonctionnelles persistantes après guérison pourtant apparente de l'infection aiguë. Ce « COVID long » peut notamment être associé à de la fatigue, de l'essoufflement, des troubles de la cognition (attention, mémoire, concentration), des troubles du sommeil, des douleurs et des troubles de l'odorat et du goût (anosmie, agueusie).

L'équipe IMOTHEP de l'Institut Fresnel vient de publier dans l'European Journal of Nuclear Medicine & Molecular Imaging, en collaboration avec l'IHU Méditerranée Infection, une étude du métabolisme cérébral en TEP au 18F-FDG portant sur 35 patients avec un diagnostic biologiquement confirmé d'infection COVID19 et des plaintes fonctionnelles persistantes au moins 3 semaines après l'épisode initiale (3 mois en moyenne, et jusqu'à 5 mois), en comparaison de 44 sujets sains non infectés. Cet examen permet de mesurer la consommation cérébrale de glucose qui constitue un marqueur du fonctionnement cérébral global. Ce travail fait suite à un premier article publié dans le même journal en juillet 2020 par l'équipe IMOTHEP. L'analyse réalisée voxel-à-voxel sur cerveau-entier identifie un hypométabolisme touchant le bulbe olfactif et les régions connectées du système limbique vers le tronc cérébral et le cervelet, avec une classification correcte de tous les sujets sur la base de ce biomarqueur de neuro-imagerie fonctionnelle. Ces régions sont notamment impliquées dans l'olfaction, la mémoire, la régulation des émotions, et les fonctions non soumises au contrôle volontaire (système nerveux autonome). La sévérité de cet hypométabolisme cérébral était corrélée au nombre de troubles persistants, et associée aux différents symptômes étudiés. Ces formes persistantes étaient par ailleurs plutôt associées à un âge jeune, sans lien avec la gravité initiale de l'infection. Une faible représentation de patients tabagiques étaient également notée dans l'étude. De façon plus préliminaire, l'hypométabolisme du bulbe olfactif semblait être rattaché aux récepteurs ACE, avec un meilleur métabolisme chez les patients initialement traités par spray décongestionnant, suggérant un possible rôle de ces récepteurs comme passerelle olfactive du neurotropisme (du nez et de la sphère ORL vers le cerveau).

Contact chercheur :

Eric Guedj, équipe IMOTHEP

Références : Guedj E, Champion JY, Dudouet P, Kaphan E, Bregeon F, Tissot-Dupont H, Guis S, Barthelemy F, Habert P, Ceccaldi M, Million M, Raoult D, Cammilleri S et Eldin C ; *"18F-FDG brain PET hypometabolism in patients with long COVID"*

[European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging](#)

Guedj E, Million M, Dudouet P, Tissot-Dupont H, Bregeon F, Cammilleri S et Raoult D ; *"18F-FDG brain PET hypometabolism in post-SARS-CoV-2 infection : substrate for persistent/delayed disorders ?"*

[European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging](#)

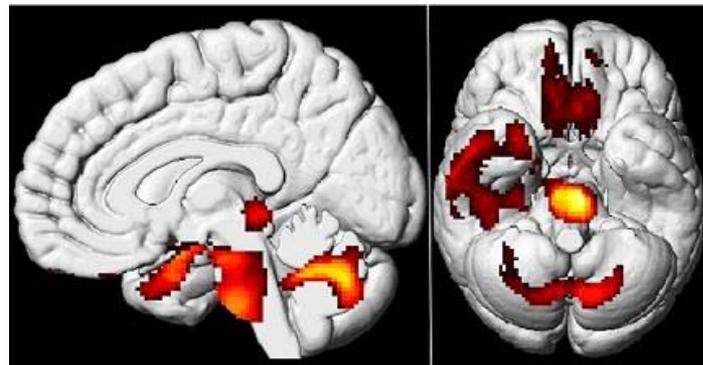
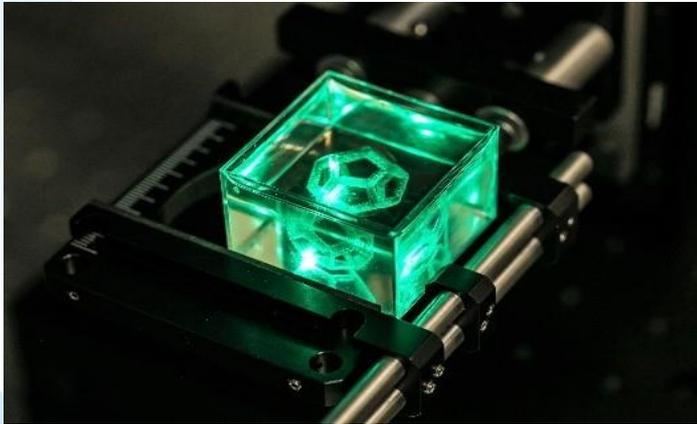


Figure : Hypométabolisme cérébral retrouvé en TEP au 18F-FDG chez les patients présentant un COVID long. En comparaison de sujets sains sans antécédents d'infection au COVID19, les patients avec un COVID long présentaient un hypométabolisme du bulbe olfactif et des régions limbiques connectées, jusque vers le tronc cérébral et le cervelet.

Ces résultats montrent la réalité cérébrale des symptômes du Covid long, et valident le ressenti des patients. En perspectives, ces travaux pourraient suggérer de nouvelles études pour démontrer l'intérêt du traitement précoce de l'infection et l'inflammation de la sphère ORL, afin d'éviter une possible extension secondaire du processus pathologique vers le cerveau. En l'absence de lésion structurale séquellaire démontrée à ce stade en imagerie morphologique (notamment en IRM), ces résultats pourraient également suggérer des approches de réactivation de ce réseau cérébral hypofonctionnel par des stratégies de rééducation et réadaptation sensorielle, cognitive et physique. Le suivi longitudinal de ces patients est en cours pour affirmer la réversibilité ou la persistance de ces anomalies du métabolisme cérébral à 9 mois.

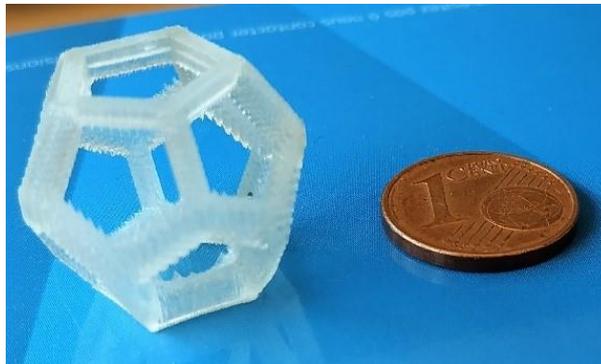
Researchers Develop Laser-Based Process to 3D Print Detailed Glass Objects

Multiphoton polymerization approach might one day be used to print complex optics



Nous introduisons un nouveau procédé laser reposant sur la polymérisation multiphotonique pour produire des pièces en verre 3D complexes. Un faisceau laser focalisé et intense est utilisé pour polymériser une résine transparente, chargée en nanoparticules de silice, à la longueur d'onde du faisceau laser par des processus d'absorption non linéaires. L'objet est créé directement dans le volume, surmontant la limitation du processus couche par couche usuellement utilisé en impression 3D. Le procédé permet la production de pièces en silice avec des processus de déliantage et de frittage de l'objet polymérisé. Des objets 3D de dimensions centimétriques sont obtenus avec la densité de la silice massive et une résolution qui dépend de la taille du spot laser.

Figures : Researchers have developed a new laser-based process for 3D printing intricate parts made of glass. It uses multiphoton polymerization to create the object directly in a 3D volume.



Références : Thomas Doualle, Jean-Claude André et Laurent Gallais ; "3D printing of silica glass through a multiphoton polymerization process"

Optics Letters Vol. 46, Issue 2, pp. 364-367 (2021)
<https://doi.org/10.1364/OL.414848>

Contact chercheur :

Laurent Gallais, équipe ILM

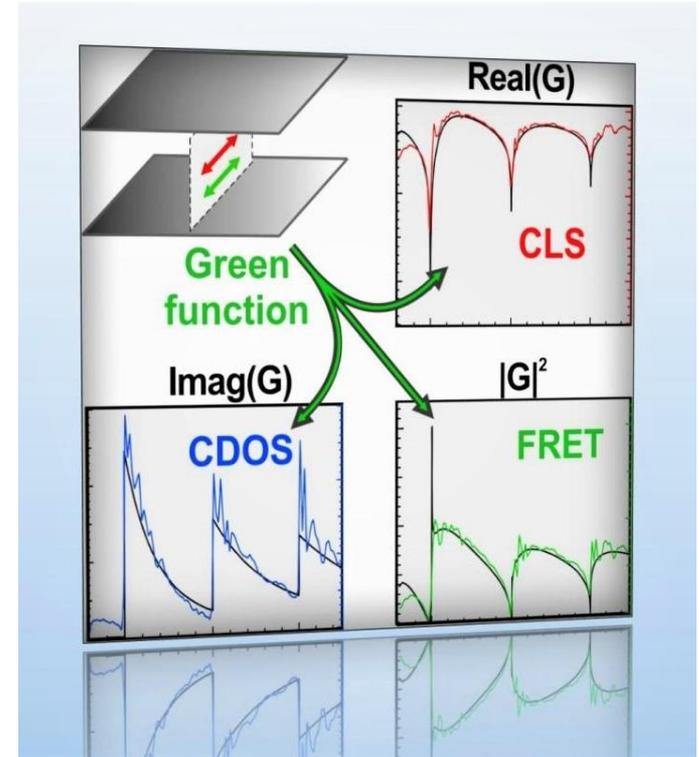
Caractérisation ultrarésolue de la fonction de Green complexe en nanophotonique

Des mesures ultra-précises pour optimiser les structures photoniques

La fonction de Green joue un rôle central dans la propagation des ondes, car elle décrit la réponse d'un système à une impulsion arbitraire. Cependant, la mesurer expérimentalement est très difficile car il s'agit d'une quantité complexe qui doit être mesurée avec une résolution spatiale nettement sous-longueur d'onde. Ces exigences ont considérablement limité les tentatives expérimentales de mesure de la fonction de Green jusqu'à présent.

Dans le cadre de l'IRP ALPhFA, des chercheurs de notre laboratoire et de l'Institute for Photonics and Optical Sciences (IPOS) de l'Université de Sydney ont mis au point une méthode expérimentale pour mesurer et caractériser pleinement la fonction de Green en enregistrant l'impédance mutuelle entre deux dipôles à des fréquences micro-ondes. L'efficacité de cette approche est démontrée en effectuant ces mesures à l'intérieur d'une cavité planaire résonnante de miroirs parallèles ou non parallèles, à une résolution cent fois inférieure à la longueur d'onde.

Les résultats obtenus sont conformes aux prédictions théoriques, ce qui confirme la validité de cette approche.



Références : K. Rustomji, M. Dubois, P. Jomin, S. Enoch, J. Wenger, C. Martijn de Sterke et R. Abdeddaim ; *"Complete electromagnetic dyadic Green function characterization in a complex environment – resonant dipole-dipole interaction and cooperative effects"*

Physical Review X, Vol 11 Issue 2

Article sur le [site internet de l'INSIS](#)

Contacts chercheurs :

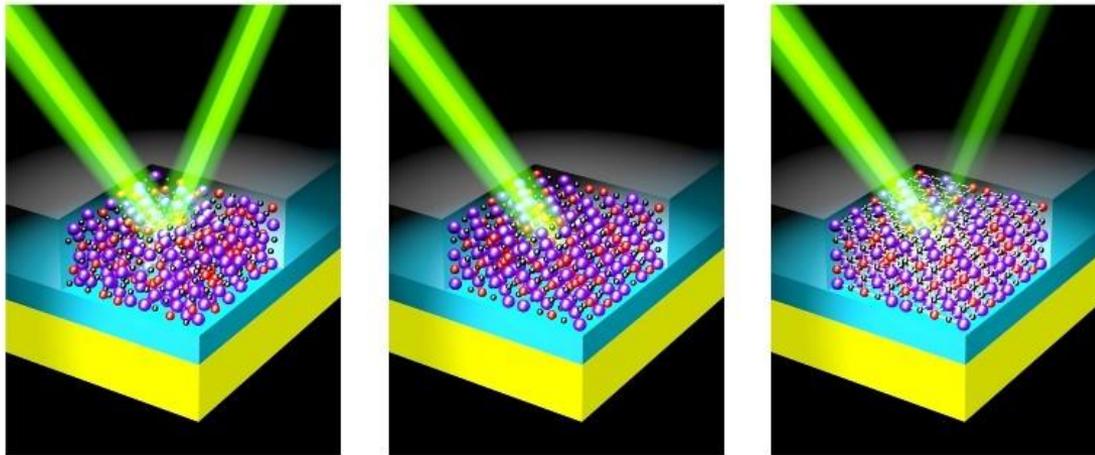
Redha Abdedaïm et Stefan Enoch, équipe CLARTE

Jérôme Wenger, équipe MOSAÏC

Transformer un miroir en absorbant optique

Reconfigurable Flat Optics with Programmable Reflection Amplitude Using Lithography-Free Phase-Change Material Ultra-Thin Films

Des équipes de recherche de l'INL, du CRHEA, de ST-Microelectronics et de l'Institut Fresnel ont récemment conçu un dispositif optique réfléchissant ($R=80\%$) pouvant se transformer de manière réversible en un dispositif très absorbant ($A=99,9995\%$) réduisant ainsi sa réflectivité d'un facteur 10 000. Le dispositif proposé inclut une couche mince de matériau à changement de phase (GeSbTe). Il ne requiert pas de lithographie et peut dès à présent être fabriqué à grande échelle et être implémenté dans des composants optiques de grandes dimensions aux propriétés optiques versatiles et reconfigurables.



Figures : Faisceau lumineux dans le proche infrarouge réfléchi par un empilement comprenant une couche mince de GeSbTe (GST), un espaceur diélectrique et une couche d'or. Le changement de phase de GST induit une très grande modulation des propriétés optiques, allant de la forte réflexion à l'absorption parfaite

Références : S. Cueff, A. Taute, A. Bourgade, J. Lumeau, S. Monfray, Q. Song, P. Genevet, B. Devif, X. Letartre et L. Berguiga ;
"Reconfigurable Flat Optics with Programmable Reflection Amplitude Using Lithography-Free Phase-Change Materials Ultra-Thin Films"

Advanced Optical Materials

<https://doi.org/10.1002/adom.202001291>

Retrouvez également l'[article consacré à ces travaux sur le site du CNRS - INSIS](#)

Contact chercheur :

Julien Lumeau, équipe RCMO

Cape thermique active et mimétisme

Un groupe international de mathématiciens appliqués et physiciens a trouvé un moyen de soustraire la présence d'un objet à des mesures thermiques. La nouveauté de leur approche repose sur le fait qu'ils utilisent des pompes à chaleur actives plutôt que des matériaux complexes passifs pour effacer la signature thermique d'un objet dans des régimes transitoires. Ces pompes permettent également de tromper un observateur en imitant la réponse thermique d'autres objets, d'où le terme mimétisme. Elles sont disposées sur une surface appelée cape thermique active qui entoure l'objet à dissimuler et sur laquelle on mesure la température et le flux thermique.

Un réfrigérateur est un exemple de la vie courante d'une pompe à chaleur : pour refroidir les aliments, la chaleur est transférée de l'intérieur à l'extérieur. Utiliser de telles pompes à chaleur est une alternative simple à l'emploi de métamatériaux aux propriétés thermiques complexes.

La méthode repose sur un modèle mathématique rigoureux, mais elle présente aussi l'avantage d'être réalisable en pratique puisque des pompes à chaleur à effet Peltier existent déjà dans le domaine de l'ingénierie. Les chercheurs estiment que leur méthode pourrait être utilisée pour un contrôle ciblé et quasi instantané de l'évolution de la température dans un milieu. Un autre atout de leur modèle mathématique est qu'il s'applique à tout phénomène diffusif. Une des applications potentielles de ces recherches est dans l'administration ciblée de médicaments dans des tissus biologiques.

Références : Maxence Cassier, Trent DeGiovanni, Sébastien Guenneau et Fernando Guevara Vasquez ; *"Active thermal cloaking and mimicking"*

Proceedings of the Royal Society of London. Series A
<https://doi.org/10.1098/rspa.2020.0941>

Article sur le [site internet de l'Imperial College](#)

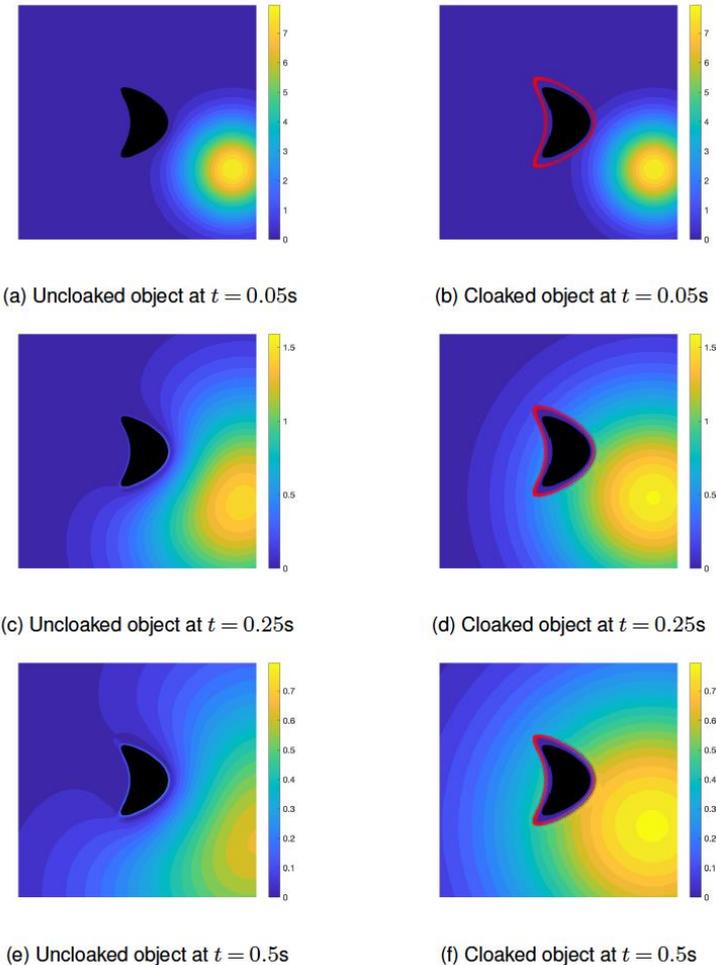
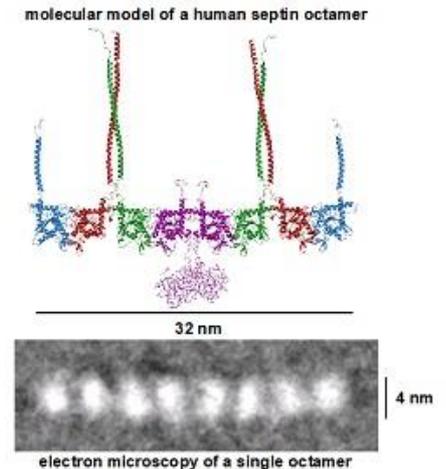


Figure 10. Numerical example of the object cloaking problem, with object to hide having homogeneous Dirichlet boundary conditions. The incident field is produced by a point source at $x = (0.9, 0.3)$ and $t = 0s$. The left images (a), (c) and (e) show time snapshots of the object without the cloak and the right images (b), (d) and (f) the corresponding snapshots when the cloak is active. Placing the cloak close to the object is a challenging simulation because we expect that numerical errors will be higher near the boundary.

Contact chercheur :
Maxence Cassier, équipe EPSILON

De nouveaux outils pour révéler le fonctionnement des septines humaines

Les septines constituent une famille de protéines impliquées dans diverses fonctions biologiques, de la division cellulaire à la motilité cellulaire et à la morphogenèse des tissus animaux. En physiopathologie humaine, un rôle des septines a été établi dans les neuropathies, l'infertilité et la tumorigenèse. Malgré leurs rôles essentiels, la façon dont les septines humaines s'organisent et fonctionnent dans les cellules reste mal comprise. Les septines humaines existent sous la forme d'hétéro-octamères contenant la SEPTIN9. Un grand nombre de travaux ont impliqué la SEPTIN9 dans divers cancers humains. L'amyotrophie névralgique héréditaire (HNA), une neuropathie rare, a été associée à des mutations de la SEPTIN9. La compréhension de la fonction de la SEPTIN9 nécessite donc l'étude des septines dans le contexte de leur assemblage physiologique en complexes hétéro-octamériques.



A cette fin, un travail de collaboration entre des biologistes de l'Institut Fresnel et des biophysiciens de l'Institut Curie et de la TU Delft a permis d'isoler pour la première fois des complexes hétérooctamériques recombinants de septines humaines contenant la SEPTIN9. Une combinaison d'essais biochimiques et biophysiques, de microscopie de fluorescence et de microscopie électronique a confirmé la nature octamérique des octamères isolés, et a montré que les octamères recombinants se polymérisent en filaments. Des études de reconstitution ont montré que ces octamères se lient directement à des filaments d'actine, ce qui soulève la possibilité que le cytosquelette d'actine décoré par les septines dans les cellules reflète des interactions directes actine-septine. Les études de reconstitution d'octamères recombinants contenant la SEPTIN9 avec des interacteurs physiologiques de la septine, tels que les membranes et les microtubules, promettent de fournir une approche complémentaire puissante aux études de la septine dans les modèles animaux et cellulaires.

Références : Iv, F., Silva Martins, C., Castro-Linares, G., Taveneau, C., Barbier, P., Verdier-Pinard, P., Camoin, L., Audebert, S., Tsai, F.-C., Ramond, L., Llewellyn, A., Belhabib, M., Nakazawa, K., Di Cicco, A., Vincentelli, R., Wenger, J., Cabantous, S., Koenderink, G.H., Bertin, A. et Manos Mavrikis ; *"Insights into animal septins using recombinant human septin octamers with distinct SEPT9 isoforms"*

Journal of Cell Science

<https://doi.org/10.1242/jcs.258484>

Contact chercheur :

Manos Mavrikis, équipe MOSAÏC

Expansions spectrales des systèmes optiques ouverts et dispersifs : régularisation et convergence Gaussiennes

Compte tenu de l'importance des méthodes modales en physique des ondes pour décrire les propriétés et la dynamique des systèmes fermés en termes de modes propres et valeurs propres, les physiciens ont tout naturellement cherché à décrire les systèmes ouverts en termes d'états propres de systèmes ouverts caractérisés par des valeurs propres complexes (souvent appelés états résonants ou modes quasi-normaux). Notre travail fait appel à l'interaction des ondes électromagnétiques avec les particules pour résoudre deux obstacles majeurs associés à ces développements.

Le premier problème est de savoir comment définir les produits scalaires d'états résonants malgré le fait que les fonctions d'onde des états résonants divergent de façon exponentielle en champ lointain. La résolution de cette problématique est cruciale pour définir des concepts comme l'orthogonalité et la normalisation des états de résonants et a par conséquent reçu une forte attention et a motivé de nombreux travaux. Nous présentons dans ce travail les intérêts d'une technique de régularisation gaussienne qui peut produire des résultats entièrement analytiques dans certaines circonstances (comme la diffusion à partir d'une sphère), et des résultats partiellement analytiques dans des situations plus générales.

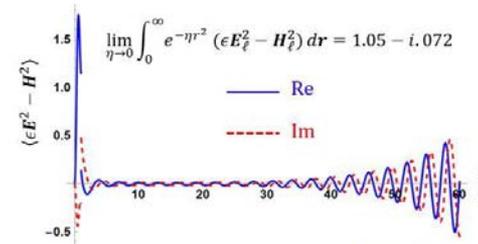
Une fois le problème du produit scalaire résolu, nous abordons un autre problème qui n'a été apprécié que très récemment, à savoir que les expansions spectrales d'états résonants tronquées directement peuvent « converger » lentement, voire ne pas converger du tout. Nous proposons une solution à ce problème qui consiste à contraindre les expansions spectrales tronquées à obéir à la même structure analytique et aux mêmes lois de conservation que les solutions complètes.

Références : Brian Stout, Rémi Colom, Nicolas Bonod et Ross Mc Phedran ; "*Spectral expansions of open and dispersive optical systems : Gaussian regularization and convergence*"

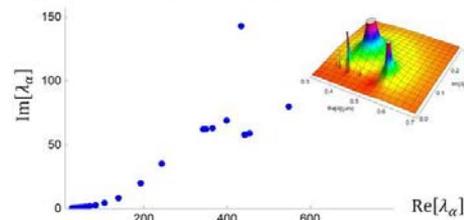
New Journal of Physics, Volume 23, August 2021

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1367-2630/ac10a6/meta>

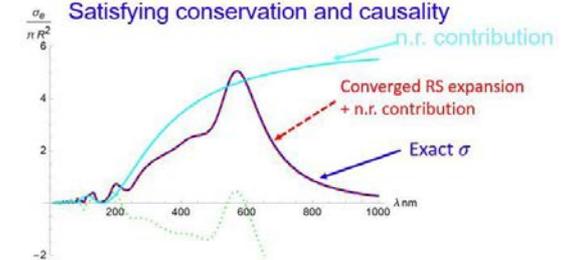
Regularizing Resonant State divergences : "Killing Mie softly"



Resonant States in dispersive media:



Response functions : Satisfying conservation and causality



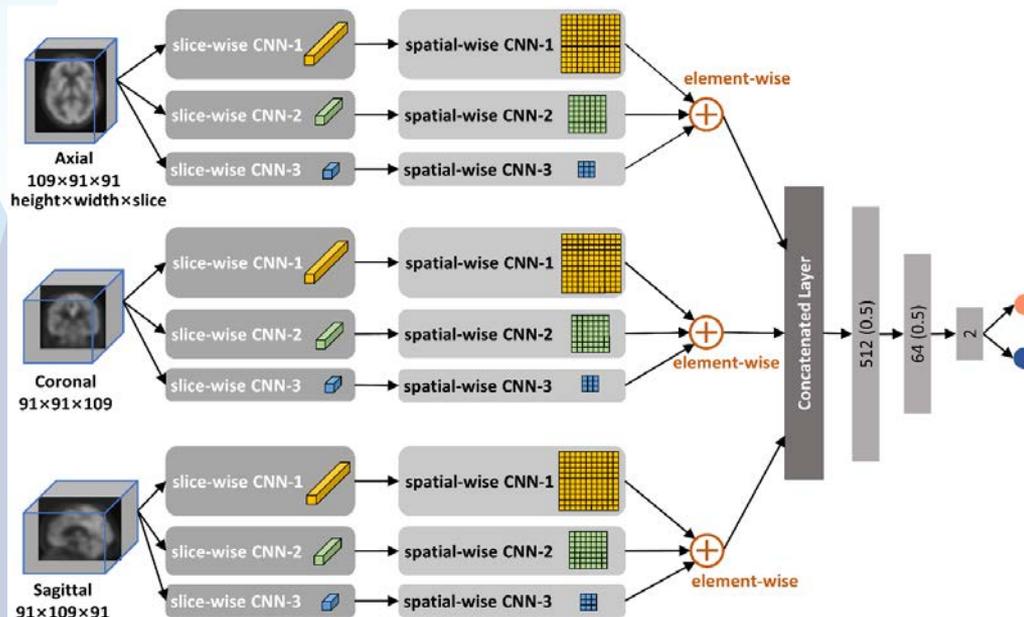
Contacts chercheurs :

Brian Stout, équipe CLARTE

Aider au Diagnostic de la Maladie d'Alzheimer par l'Intelligence Artificielle en Imagerie TEP du Métabolisme du Glucose

La Maladie d'Alzheimer (MA) est l'une des maladies neurodégénératives les plus répandues dans le monde. Elle touche plus de 50 millions de personnes et ce nombre dépassera les 152 millions d'ici 2050, si cette situation perdure, constituant ainsi la principale cause de mortalité chez les personnes âgées. Au stade prodromique un sujet atteint de Trouble Cognitif Léger (TCL) peut évoluer vers la démence. Une des difficultés majeures actuelles est d'identifier, parmi les sujets TCL, ceux qui dans le temps vont développer une démence de type MA.

La Tomographie par Emission de Positrons (TEP) au 18 Fluoro-Deoxy-Glucose est une modalité d'imagerie moléculaire qui contribue au diagnostic précoce de cette maladie, en mesurant la consommation de Glucose des régions anatomiques du cerveau.



L'aide au diagnostic assistée par ordinateur que nous avons développée permet de répondre au défi de l'identification, sur l'image TEP d'un sujet, d'une MA au stade de TCL. A cet effet, un Réseau de Neurones Convolutif (RNC) pyramidal séparable profond est conçu sur la base d'un apprentissage des vues coronales, sagittales et axiales d'images TEP. Cette architecture 2D séparable a permis de réduire considérablement le nombre de paramètres d'apprentissage, comparée au classique RNC 3D, tout en donnant de meilleures performances en termes de taux de bonne classification.

L'approche développée, appliquée à la base de données Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative (ADNI) montre des très bons résultats (83 % de taux de bonne classification), comparés aux méthodes basées sur l'apprentissage automatique (en moyenne à 76 % de taux de bonne classification) à bases de réseaux de neurones profonds y compris les 3D RNC.

Références : Xiaoxi Pan, Trong-Le Phan, Mouloud Adel, Caroline Fossati, Thierry Gaidon, Julien Wojak, Eric Guedj ; *"Multi-View Separable Pyramid Network for AD Prediction at MCI Stage by 18F-FDG Brain PET Imaging"*

IEEE Transactions on Medical Imaging (Volume : 40, Issue : 1, Jan. 2021)

<https://ieeexplore.ieee.org/document/9187697>

Contacts chercheurs :

Mouloud Adel, équipe GSM et
Eric Guedj, équipe IMOTHEP

Percer le nano-monde des parois cellulaires végétales grâce à l'imagerie hyperspectrale en champ proche optique

La matière végétale est une ressource naturelle, écologique et renouvelable, largement exploitée que ce soit à l'état brut comme matériau de construction, à l'état composite pour l'industrie du papier, ou encore à l'état transformé dans les biocarburants et les bioplastiques. Ce biomatériau est très attractif pour ses propriétés mécaniques, chimiques, thermiques et optiques. Cependant, une préoccupation majeure dans l'industrie du bois, est de gérer sa biodégradabilité, son instabilité et sa rentabilité en développant des traitements physico-chimiques. Ces traitements induisent des modifications locales de la composition chimique des parois cellulaires végétales (PCW), affectant ainsi leurs propriétés physiques et morphologiques.

Malgré les récentes études sur ces "matériaux à des échelles proches des distributions moléculaires, de nombreuses questions restent en suspens : Comment les modifications chimiques impactent les propriétés physiques (mécaniques, hygroscopiques, thermiques, optiques) à l'échelle nanométrique ? Comment les propriétés physiques modifiées de la PCW peuvent-elles avoir un impact positif sur l'industrie du bois ?...

Nous apportons des éléments de réponse par l'utilisation de la microscopie optique en champ proche en partenariat avec l'entreprise Neaspec. En effet, si les PCW se composent de nano-blocs polymères élaborés, à la chimie complexe, leur réponse globale à la lumière est finalement codée par la diffusion optique provenant de ces nano-blocs individuels. La détection de la diffusion optique en champ proche, par l'intermédiaire d'une pointe nanométrique métallique, permet d'accéder aux propriétés structurales, chimiques et physiques de ces nano-blocs et donc de la paroi cellulaire.

En utilisant cette technique de microscopie couplée à de la spectroscopie infrarouge, les chercheurs du CNRS et de l'ORNL ont cartographié dans le moyen infrarouge, la paroi cellulaire de peuplier avec une résolution spatiale inférieure à 20 nm. Ces travaux ont permis d'évaluer, pour la première fois, les propriétés optiques locales in situ de la PCW associées à des variabilités chimiques et structurales locales. Ceci restait jusqu'alors non-détectable avec les techniques optiques classiques. Seules des techniques d'extraction chimique séparant les différents constituants de la paroi permettaient d'obtenir à posteriori une information sur les propriétés optiques de chaque constituant individuellement, oubliant l'impact de la structure et de l'environnement chimique.

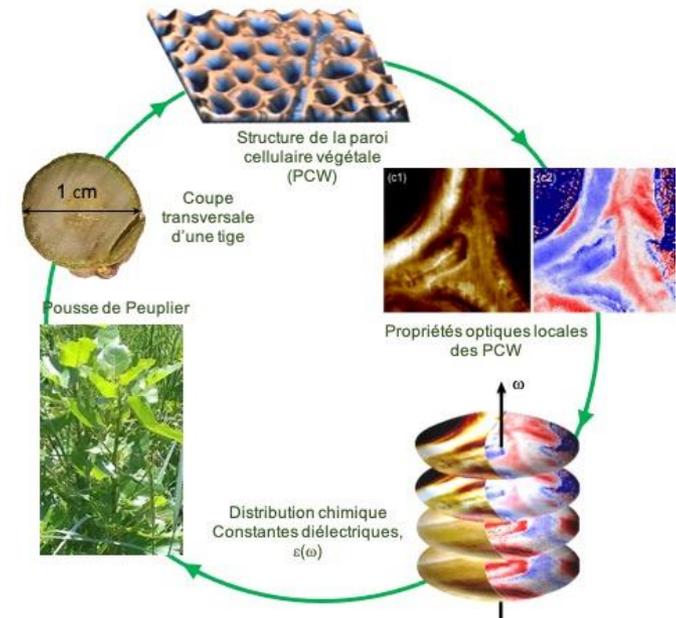
En tant que ressource durable, le bois devient un matériau de choix non seulement pour les marchés de la construction, du papier et des biocarburants, mais aussi pour le développement de composants de bâtiments intelligents, ou pour l'ingénierie de nouveaux matériaux d'origine végétale. Cette technique de microscopie optique en champ proche va faciliter de façon unique la compréhension de la morphogenèse du bois à l'échelle de la paroi. Elle apportera, par exemple, de nombreuses informations nécessaires pour une ingénierie du bois contrôlée vers le développement de composants de pointes biodégradables. Le contrôle de haute précision des propriétés mécaniques et optiques dans la production de bois reste une préoccupation majeure vers une utilisation plus efficace et raisonnée de ces biomatériaux qui n'ont pas fini de répondre à nos besoins

Références : A. Charrier, A. Normand, A. Passian, P. Schaefer et A. L. Lereu ; "In-situ plant material hyperspectral imaging : determination of chemistry and optical properties using multimodal scattering nearfield optical microscopy"

L'article a été relayé par le site internet d'Oak Ridge National Laboratory

<https://www.nature.com/articles/s43246-021-00166-7>

<https://engineeringcommunity.nature.com/posts/in-situ-plant-materials-hyperspectral-imaging-by-multimodal-scattering-near-field-optical-microscopy>



Contact chercheur :

Aude Lereu, équipe RCMO