

Document d'autoévaluation (DAE)  
Unité de recherche pluri-équipes

**CAMPAGNE D'ÉVALUATION 2022-2023**

VAGUE C

**INFORMATIONS GÉNÉRALES**

**Nom de l'unité pour le contrat en cours : Institut FRESNEL**

**Acronyme pour le contrat en cours : FRESNEL**

**Label et numéro : UMR 7249**

**Nombre d'équipes (« thèmes ») : 4**

**Domaine scientifique principal :**

**ST : Sciences et Technologies**

**Panels scientifiques (dans la nomenclature du Hcéres) par ordre décroissant d'importance :**

**Panel 1**

ST6 : Sciences et technologies de l'information et de la communication - STIC

**Panel 2**

ST2 : Physique

**Panel 3**

SVE3 : Molécules du vivant, biologie intégrative (des gènes et génomes aux systèmes), biologie cellulaire et du développement pour la science animale

**Panel 4**

SVE7 : Prévention, diagnostic et traitement des maladies humaines

**Directrice / directeur pour le contrat en cours : Sophie BRASSELET**

**Établissements et organismes de rattachement (tutelles) :**

Liste des établissements et organismes de rattachement (tutelles) de l'unité de recherche **pour le contrat en cours**

- CNRS

- Aix Marseille Université

- Ecole Centrale Marseille

## 1- PRÉSENTATION DE L'UNITÉ

**Historique, localisation de l'unité.** L'Institut Fresnel (UMR 7249) est une unité mixte Aix Marseille Université (AMU), CNRS, Ecole Centrale Marseille (ECM), dont l'activité générale couvre les domaines de l'électromagnétisme, de la photonique, de l'information et de l'image. L'unité est située principalement sur le campus de Saint Jérôme à Marseille (deux bâtiments : I. Fresnel et Espace Photonique) mais également sur le campus Santé de La Timone (au CHU et sur la plateforme CERIMED - Centre Européen de Recherche en Imagerie Médicale) où sont hébergées les activités d'imagerie préclinique et médicale. Un plateau technique spécifique aux mesures en chambre anéchoïque (géré par le Centre Commun de Recherche en Micro-ondes) est également hébergé dans les locaux de Polytech Marseille / laboratoire IUSTI situés sur le technopôle de Château-Gombert.

L'Institut Fresnel est né en 2000 du regroupement de trois laboratoires : Le Laboratoire d'Optique des Surfaces et des Couches Minces, le Laboratoire d'Optique Electromagnétique et le Laboratoire Signal Image. Il a été dirigé pendant les précédents mandats par Claude Amra (2000-2007), Hugues Giovannini (2008-2011), et Stefan Enoch (2012-2019).

L'Institut Fresnel a suivi, depuis sa création, un grand nombre de transformations dans son environnement local : création de l'école Centrale Marseille en 2006 puis d'Aix-Marseille Université (AMU) par fusion de trois universités en 2012, projet CPER "Espace Photonique" (2010-2014) qui a représenté une étape importante pour la création des plateformes *Couches Minces* et *Diffusif* en 2017, et enfin plus récemment création des Instituts d'Etablissement d'Aix Marseille Université (2018). Trois tutelles sont impliquées dans l'unité : CNRS (tutelle gestion financière unique depuis 2021), AMU (tutelle hébergeante) et Ecole Centrale Marseille. Au-delà de son périmètre géographique, l'Institut Fresnel est également impliqué dans 3 Laboratoires Communs (voir Section D4) : LabCom LABTOP (Laboratoire commun de traitement optique des surfaces avec l'entreprise CILAS, renouvelé en 2018 et 2022), LabCom LOLaH (Laboratoire Optique Lasers et Hyperfréquences avec le CEA, 2020), et Automotive Motion Lab (avec Stellantis, renouvelé en 2020). A l'international, l'Institut Fresnel a été membre, pendant la période de référence, du Laboratoire International ALPhFA (Associated Laboratory for Photonics between France and Australia, renouvelé en 2018), et coordinateur du laboratoire IMAGINano CNRS - Weizmann Institute (2016-2021) (voir Section D2R1).

Lors de sa création en 2000, l'institut Fresnel comptait 74 membres (dont 50 permanents). En 2016 lors de la précédente évaluation, il comptait 168 personnes (dont 85 permanents). **Au 31 décembre 2021, ce sont 204 personnes qui y travaillent (99 permanents, 105 non permanents dont 66 doctorants), avec plus de vingt-cinq nationalités représentées.** Parmi les permanents nous comptons 52 Enseignant-Chercheur(se)s (EC) (4 EC-APHM inclus), 24 Chercheur(se)s (C), 7 Praticiens Hospitaliers et 1 Technicien de Physique Médicale (APHM), 21 ITA/ITASS (5 ITA ingénieur(e)s d'équipes et 14 ITA administratifs et services communs techniques). A ces chiffres s'ajoutent une cinquantaine de stagiaires que nous accueillons chaque année. Le budget annuel de l'unité est passé d'environ 1.1 M€ en moyenne sur son premier quadriennal (dont environ 100 k€ de dotation annuelle des établissements de tutelle), à plus de 2.9 M€ sur la période précédente d'évaluation (dont environ 340 k€ de dotation annuelle). **Sur ce dernier quadriennal, ce budget est de près de 5.2 M€ (dont 443 k€ de dotation annuelle)** (voir la Section D1R1).

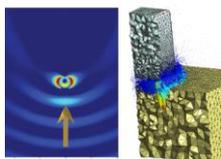
**Structuration de l'unité et thématiques scientifiques au 31/12/2021.** Lors de son premier quadriennal, l'Institut Fresnel comptait six équipes. Nous en comptons 14 aujourd'hui avec une augmentation des effectifs importante sur le dernier quadriennal (voir la Section D1R1), principalement lié aux recrutements et à l'intégration en 2018 d'une équipe de 11 personnels titulaires en imagerie médicale (équipe IMOTHEP spécialisée en imagerie nucléaire), dont 4 enseignant chercheurs-APHM. Pendant la période 2016-2021, l'unité a recruté 4 EC et 4 C, ainsi que 3 ITAs ; 18 personnels ont également rejoint l'unité en mobilité (4 EC-APHM, 7 PH, 7 ITA). Ces arrivées sont à comparer à 11 départs (5 ITA dont 1 départ en retraite, 6 EC/C dont 2 départs en retraite).

Aujourd'hui, les équipes travaillent dans des domaines variés mais reliés, couvrant théorie, sciences de l'information et du numérique, physique des ondes, biologie et imagerie médicale. Les savoir-faire se sont étendus ainsi que les domaines d'applications qui touchent, via des collaborations internes ou externes, la photonique et les nanosciences, les matériaux, l'astrophysique, le spatial, la biologie cellulaire et du développement, et les sciences médicales (Figure 1).

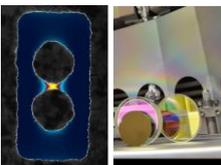


Figure 1 : Définition scientifique de l'Institut Fresnel

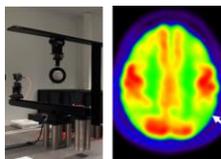
Les activités de l'institut Fresnel, décrites en Section D1R1, sont aujourd'hui caractérisées par leur caractère horizontal et interdisciplinaire, couvrant la physique, l'informatique, les mathématiques, et plus récemment la biologie et le biomédical. Elles couvrent le domaine très large des ondes (des rayons X aux micro-ondes en passant par l'optique et le THz), depuis leur nature la plus fondamentale (modélisation, électromagnétisme, optique mathématique, optique quantique, théorie du signal), jusqu'à des applications en biologie, médicales ou industrielles (instrumentations avancées, composants, Tomographie par Emission de Positrons TEP, scintigraphie, théranostique, imagerie optique, Imagerie par Résonance Magnétique IRM), incluant les aspects numériques et computationnels avancés ainsi que le traitement des signaux et des images. Ce caractère horizontal entraîne une coexistence de savoir-faire qui génère de nouveaux liens tels que : information-numérique/instrumentation, théorie/composants, imagerie/composants/biomédical, ... Cette diversité des thématiques de recherche et l'importance des effectifs avaient, dès 2015, mené à une réflexion pour que la structure du laboratoire s'organise de manière plus visible autour d'un nombre limité de grands thèmes scientifiques. A l'issue d'un processus de construction collectif de plus d'un an, quatre thèmes ont ainsi été définis avec une large adhésion du personnel scientifique du laboratoire. Ces thèmes, décrits dans les Sections D2 et D4, constituent désormais la structure scientifique de l'unité, en impliquant un nombre de EC/C/ITA publiant bien défini par un rattachement déclaré par les personnels sur un taux de 25%, 50% ou 100% :



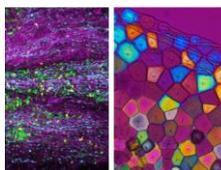
1. **Modélisation électromagnétique** (23 permanents dont 8 à 100%)  
Modèles théoriques, numériques et expérimentaux en électromagnétisme – Modèles asymptotiques – Applications.



2. **Nanophotonique et Composants** (33 permanents dont 18 à 100%)  
Nanophotonique - Antennes optiques et radiofréquences - Couches minces optiques - Interaction laser-matière aux forts flux.



3. **Information et Photonique** (27 permanents dont 11 à 100%)  
Télé-détection – Traitement de l'information et applications – Communications optiques pour l'IoT – Milieux désordonnés.



4. **Imagerie** (45 permanents dont 22 à 100%)  
Approches numériques – Instrumentation – Biologie – Imagerie médicale.

Cette structure a été approuvée lors d'un premier comité scientifique externe de l'unité en 2015 puis validée lors de la visite HCERES (2017), qui recommandait essentiellement de la consolider en lui donnant un rôle dans la politique scientifique du laboratoire. Le comité scientifique externe réuni en octobre 2020 (composition : A.-S. Bonnet Ben Dhia (POEMS, ENSTA), P. Delaporte (Université Aix Marseille), V. Devlaminck (Université de Lille), S.

Leveque Fort (ISMO Université Paris Saclay), H. Maillotte (Femto-ST, Université de Franche Comté), D. Mariano-Goulart (CHU Montpellier), L. Nicolas (CNRS)) a confirmé le sens et le rôle des thèmes. Aujourd'hui les thèmes sont des structures horizontales, regroupant des personnes d'équipes différentes (Figure 2), ainsi que les personnels publiant des services communs (2 IRs informatique, 1 IR instrumentation). Les équipes gardent un rôle opérationnel sur la gestion des crédits de recherche et la définition des besoins (RH, locaux, bourses doctorales etc) (voir Section D1R1). Certaines personnes se déclarent d'appartenance à plusieurs thèmes par la nature scientifique de leurs publications. Depuis janvier 2020, les représentants de thèmes sont élus par les membres des thèmes et accompagnés d'un(e) adjoint(e), leur mandat étant corrélé avec celui de l'unité. Cette structure, qui fonctionne aujourd'hui au quotidien, anime le dynamisme scientifique de l'unité tout en bénéficiant de l'aspect humain et opérationnel des équipes.

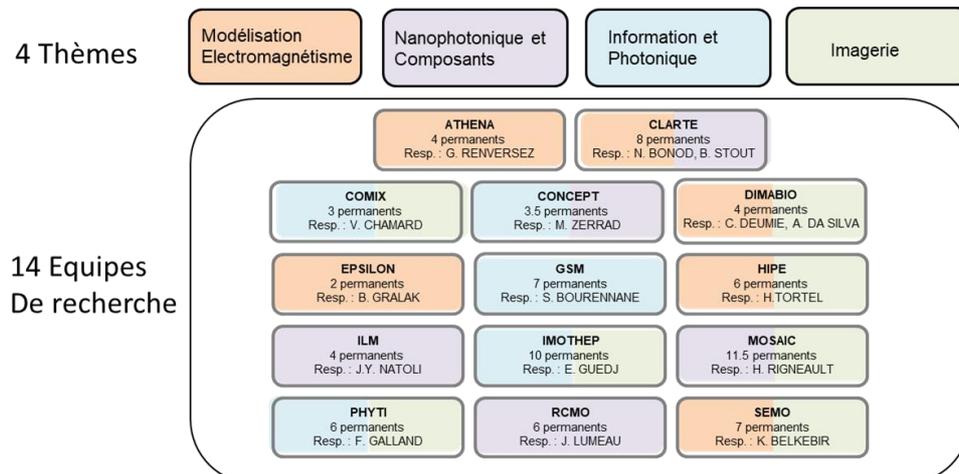


Figure 2 : Liens principaux entre équipes de recherche et thèmes de l'Institut Fresnel

**Les thèmes** permettent à tous de bénéficier d'échanges scientifiques (animation, évènements, ateliers thématiques), mais également stratégiques autour des choix de l'unité. Les personnels des thèmes se rencontrent régulièrement lors de réunions ou d'animations scientifiques (un séminaire par thème par mois, soit un séminaire par semaine). Les aspects stratégiques opérés par les représentants de thème sont : la diffusion d'informations, la définition des profils de postes en lien avec les besoins des équipes, la représentation de l'unité, présentations de bilans et organisation de la communication au travers du site web, la participation à l'arbitrage des appels à projets internes, la participation à la sélection du concours Ecole Doctorale avec les responsables d'équipes, et enfin la préparation des évaluations du laboratoire et rencontres du conseil scientifique externe. Les représentant(e)s de thèmes sont membres invité(e)s du conseil de laboratoire (CL) et participent à des réunions régulières avec la direction suivant les échéances stratégiques. Lorsque cela est nécessaire, ils/elles participent aux réunions direction - responsables d'équipes qui ont lieu environ tous les 3 mois en amont des CLs. Cette structure permet à tous les personnels du laboratoire d'accéder à l'espace de discussion de stratégie scientifique, et à l'équipe de direction d'accéder à une vision pertinente du paysage scientifique et des besoins.

Au-delà de cette structure scientifique et stratégique, l'institut Fresnel est organisé autour de services communs, de deux plateformes et deux plateaux techniques (décrits en Section D2R4) et de structures liées à des missions transverses dans lesquels de nombreux personnels sont impliqués (voir Figure 3). **Les services communs** sont organisés autour de différents axes : responsable administrative (1 ITA), gestion financière (3 ITAs + 1 CDD), RH (1 ITA + 0.5 CDD), informatique (4 ITAs + 1 CDD), accueil (1 ITA + 1 CDD), communication (1 ITA + 0.5 CDD), instrumentation et mécanique (3 ITAs). Le financement des CDDs, indispensables pour le fonctionnement du laboratoire sous un flux important de rentrées de contrats et de personnels non-permanents, est assuré par un prélèvement de 4% sur contrats (voir Section D1R1).

Enfin certaines **structures transverses** ont été définies pour les aspects opérationnels du laboratoire. Le Conseil de laboratoire (18 membres, dont 10 élus) se réunit environ tous les 3 mois. Les représentants de thèmes sont invités ainsi que les représentants des aspects organisationnels de l'unité (réfèrent patrimoine/locaux et représentant de la commission informatique notamment). La Commission Informatique (14 membres) se réunit environ deux fois par an avec pour objectif l'organisation des aspects maintenance/jouissance/organisation du matériel commun informatique du laboratoire, ainsi que les aspects sécurité et inventaire informatique. La Commission Hygiène et Sécurité (7 membres) est dirigée par deux Assistants de Prévention (APs), accompagnés de référents laser, chimie/biologie et radioprotection. La Commission Risques Psychosociaux (9 membres) a été créée en 2021 (voir Section D1R3). Le Groupe de travail IA « Intelligence Artificielle » (11 membres) vise à organiser depuis 2020 les connaissances en IA au laboratoire (voir Section D1R2), le Groupe de travail Développement Durable (3 membres) organise les actions en faveur d'une meilleure gestion de notre impact sur l'environnement (voir Section D1R3). Enfin des missions transverses sont exercées par les personnels pour le fonctionnement du laboratoire : Réfèrent patrimoine/locaux, Correspondante Formation, Correspondant

Europe – international (CNRS), Correspondant Science Ouverte, Correspondant Sécurité du Système d'Information, Référente montage ANR, Référent valorisation, Référente médiation formation scientifique.

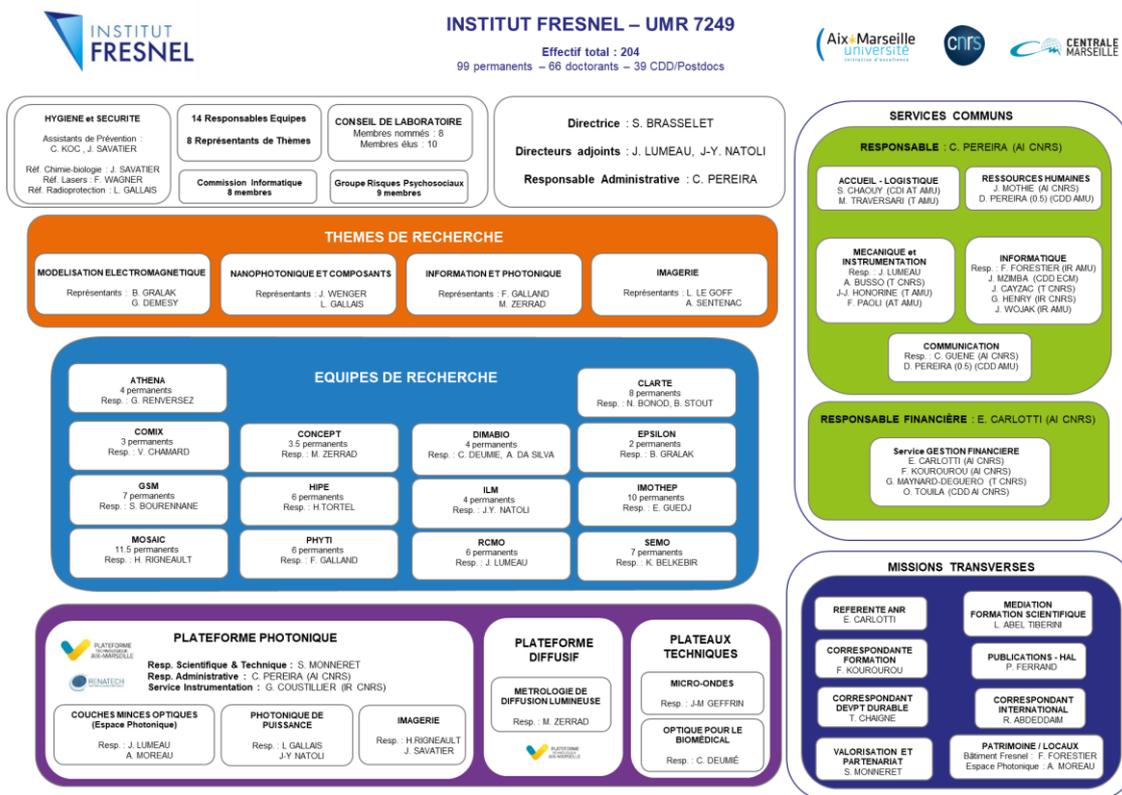


Figure 3 : Organigramme de l'institut Fresnel, situation au 31/12/2021

La figure suivante présente l'analyse SWOT de l'Institut Fresnel.

### SWOT Institut Fresnel

Forces	Faiblesses
<ul style="list-style-type: none"> <li>Hybridation remarquable de compétences horizontales</li> <li>Résultats scientifiques de premier plan</li> <li>Diversité d'expertises, de projets : interdisciplinarité</li> <li>Capacité d'innovation</li> <li>Capacité d'adaptation</li> <li>Représentation équilibrée du personnel sur les 3 tutelles</li> <li>Succès aux AAPs dans les domaines appliqués</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Trop peu de personnels IT techniques avancées</li> <li>Précarité des CDDs sur des postes à expertise pointue</li> <li>Progression de carrière floue à tous les niveaux</li> <li>Conditions difficiles pour l'attractivité des jeunes talents</li> <li>Maintenance complexe du parc expérimental important</li> <li>Faibles surfaces disponibles de locaux bureaux/expériences</li> </ul>
Opportunités	Menaces
<ul style="list-style-type: none"> <li>Partenariats interdisciplinaires</li> <li>Partenariats industriels</li> <li>Plateformes</li> <li>Visibilité croissante dans certains domaines</li> <li>Instituts d'Etablissement AMU</li> <li>Collaborations SPV CNRS – DRV AMU – DRI AMU...</li> <li>Equipex, CPER, PEPR</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Montée en puissance du travail administratif</li> <li>Courbe des âges (moy. age 48 ans)</li> <li>Recrutement des CDDs (cout, précarité)</li> <li>Couts des infrastructures</li> <li>Difficulté de financements et recrutements sur les projets fondamentaux</li> <li>Compétition dans les domaines bio/médical</li> </ul>

Figure 4 : Analyse SWOT de l'institut Fresnel

## 2- PROFIL D'ACTIVITÉS

Le profil d'activités présente peu de différences entre les thèmes, il est donc présenté pour l'ensemble de l'unité.

Activités	Répartissez 0 à 100 sur ces 7 items
<b>Administration de la recherche</b> (responsabilité de pilotage de la recherche (VP, Direction d'Institut, DAS, ...) participation à des instances d'évaluation (CNU, CoNRS, CSS...), responsable de volet IdEx, direction de projets -ANR, Horizon Europe, ERC, CPER-, responsabilités éditoriales dans des revues ou collections nationales et internationales)	10
<b>Dissémination de la recherche</b> (partage de connaissances avec le grand public, médiation scientifique, interface science/société)	5
<b>Encadrement de la recherche</b> (implication au niveau D ainsi que dans le suivi de projets post-doctoraux)	20
<b>Contribution à l'adossement d'enseignements innovants à la recherche</b> (EUR, SFRI, etc.)	0
<b>Expertise technique</b> (pouvoirs publics aux niveaux national et régional, entreprises, instances internationales (FAO, OMS, ...))	0
<b>Recherche</b>	55
<b>Valorisation, transfert, innovation</b>	10
Le total doit impérativement être égal à 100	

### 3- ENVIRONNEMENT DE RECHERCHE

**Implications dans les structures à l'échelle de l'établissement et du site.** La contribution de l'Institut Fresnel à l'échelle marseillaise est marquée par son implication importante dans les instituts d'Etablissement, structures créées par AMU (18 au total) et s'appuyant sur les laboratoires, les facultés et écoles de l'université, ainsi que sur ses partenaires socio-économiques, pour renforcer l'ouverture de l'université à l'international, l'innovation et l'interdisciplinarité. Ces instituts, qui représentent les grands domaines scientifiques d'AMU, offrent un espace de collaboration de recherche et de formation, d'appels d'offres recherche et bourses de stage et de doctorat. Parmi ces instituts, trois sont majeurs pour l'unité (impliquant plus d'une quarantaine de EC/C/IT) : *Marseille Imaging* (<https://www.univ-amu.fr/marseille-imaging>); orienté vers l'imagerie biologique et médicale, institut co-créé et dirigé par le précédent directeur de l'institut Fresnel (S. Enoch), et dans lequel un membre de l'I. Fresnel est également responsable de la formation (M. Adel), *AMUTech* (<https://www.univ-amu.fr/fr/public/institut-amutech>) orienté vers les sciences des matériaux et les nanotechnologies, et *Archimède* (<https://labex-archimede.univ-amu.fr/>) orienté vers les mathématiques, l'informatique et la science des données, instituts dans lequel deux membres de l'I. Fresnel sont actifs au titre de membre du conseil et de la commission recherche. Les personnels de l'I. Fresnel ont contribué à la création de *Marseille Imaging* et *AMUTech* dès leur construction. D'autres instituts impliquent entre 5 à 10 EC/C/IT par institut : *MarMaRa* (médical Marseille Maladies Rares), pour lequel l'I. Fresnel accueille depuis 2021 une formation en optique pour la biologie, *NeuroMarseille* (neurosciences), *ISFIN* (Institut des Sciences de la Fusion et de l'Instrumentation en Environnements Nucléaires), *Laënnec* (Sciences numériques et intelligence artificielle pour la santé), *ORIGINES* (De la formation des planètes à l'émergence de la vie). L'I. Fresnel fait partie de l'institut Convergences CENTURI Turing Centre for Living Systems (<https://centuri-livingsystems.org/>), orienté vers l'interface entre sciences mathématiques, physique et biologie. Les personnels sont impliqués dans ces instituts par leur présence aux conseils d'instituts (5 instituts concernés), par la participation aux comités d'arbitrage, l'organisation d'évènements scientifiques, ou de formations niveau master/doctorat, mais également pour la définition des futurs outils de la politique scientifique de l'université (projet *TIGER*, Transformer et innover dans la formation graduate via la recherche, PIA3 Action « Grandes Universités de Recherche » AAP SFRI « Structuration de la formation par la recherche dans les Idex »). Enfin, les activités de l'unité en imagerie médicale étaient déclinées au sein du DHU-Imaging sous la direction de l'actuel responsable d'équipe IMOTHEP (E. Guedj), qui s'est prolongé en 2018 par la création de l'institut *Marseille Imaging* dont le périmètre thématique s'est étendu aux autres champs de l'imagerie au-delà de l'imagerie moléculaire, du théranostique et de l'imagerie interventionnelle. Une dizaine de personnels de l'I. Fresnel travaillent aujourd'hui sur des instruments hébergés dans l'UMS CERIMED (Centre Européen de Recherche en Imagerie Médicale, sur le campus Timone), participant au rayonnement de cette structure : d'une part sur les recherches en préclinique (imagerie du petit animal par IRM, photo-acoustique ou optique,

impliquant environ 3 personnels permanents des équipes DIMABIO et CLARTE) et sur les recherches cliniques en collaboration avec l'APHM (ophtalmologie, imagerie médicale TEP et IRM, environ 13 personnels permanents des équipes IMOTHEP, DIMABIO et CLARTE).

**Opportunités du site et environnement de recherche.** Les opportunités nouvelles au sein du site et d'Aix Marseille Université (actions A\*Midex pour l'interdisciplinarité et les plateformes, actions des Instituts d'Etablissement pour les financements de stages, Ph.D. programs et postdoctorants, ...) renforcent les liens entre les laboratoires marseillais et en créent de nouveaux. Les interactions avec le site (menant à des co-publications ou des soumissions de projets) se font aujourd'hui dans les domaines des sciences de la vie (principalement site de Luminy : CIML, IBDM, INMED et via l'Institut CENTURI) et du médical (site de La Timone (CRCM, INP, INT, MMG, CERIMED), CHU La Timone pour l'imagerie nucléaire, la neurologie, ophtalmologie, histopathologie, oncologie ; Institut Paoli Calmette ; Hôpital Nord), mais également en physique (lasers LP3, fusion PIIM, astrophysique et instrumentation du spatial LAM) et nanosciences (CINAM), mathématiques et informatique (LIS, I2M), et enfin physique théorique (CPT). L'unité est également attentive au développement des ressources du numérique sur le site d'Aix Marseille. Le Datacenter Régional SUD (campus Étoile de l'Université) doit notamment offrir un service de stockage des données pour la recherche qui sera important pour le fonctionnement des plateformes à terme. Le mésocentre d'Aix Marseille Université offre des opportunités d'utilisation d'outils de calcul intensif ou parallèle déjà utilisés par les personnels de l'unité, qu'il est nécessaire de définir en complémentarité des moyens internes à l'I. Fresnel (voir Section D1R1).

**Implications dans les structures de valorisation.** L'activité grandissante en valorisation de l'unité (déclarations d'invention, projets de pré-maturation ou maturation) augmente la collaboration avec les structures de valorisation du site (Service Partenariat Valorisation SPV CNRS, DRV AMU, institut CARNOT STAR, A\*Midex) grâce à une communication accrue auprès des personnels, de co-financement RH ou les opportunités d'appels d'offres (voir Section D4). L'I. Fresnel propose aujourd'hui deux plateformes labellisées « Plateformes Technologiques du site d'Aix-Marseille » réunissant Aix-Marseille Université et ses partenaires (CNRS, INSERM), les plateformes *Photonique* et *Diffusif* (voir Section D2R4 et Annexe 3). Ces plateformes offrent, pour les académiques et industriels, des ressources en instrumentation, caractérisation optique, et fabrication de composants. Certains projets récents PIA3 Equipex+ et CPER coordonnés ou gérés en tant que partenaire par l'I. Fresnel participent pleinement aux investissements de ces plateformes (voir Section D2R3).

**Implications dans les structures de formation.** Les personnels de l'I. Fresnel sont impliqués dans les instances de formation, occupent ou ont occupé les rôles de direction adjointe et de direction de départements d'enseignement (L. Siozade Dir. Adjointe Dept. Physique à l'UFR Sciences, H. Tortel Dir. Dept. Microélectronique et Télécommunications à Polytech). L'I. Fresnel a contribué à la création de trois masters, dont deux à l'échelle internationale coordonnés par des ECs des thèmes Imagerie, Modélisation Electromagnétique et Information et Photonique : **Master International Europhotonics** de AMU (créé en 2010 dans le cadre d'un programme EMMC Erasmus Mundus par des EC/C de l'I Fresnel, aujourd'hui Erasmus+, responsables 2021 A. Litman et F. Wagner). Ce master réunit environ 25 étudiants en M1 et 25 (+ 5 étudiants ECM) en M2 dans les domaines « Photonics Engineering, Biomedical Imaging, Quantum Optics, Laser Optics, Optics for Astronomy, Nanophotonics, Biophotonics ». Les partenaires sont Karlsruhe School of Optics & Photonics of Karlsruhe Institute of Technology, Allemagne ; Universitat Politècnica de Catalunya, Espagne ; Institute of Photonic Sciences, Espagne ; Universitat de Barcelona, Universitat Autònoma de Barcelona, Espagne ; Tampere University-Finland, Vilnius University-Lithuania ; **Master Traitement du Signal et des Images (TSI)** de AMU créé en 2019 (resp. M. Adel) (environ 40 étudiants M1, et 15-20 étudiants en M2 dans les domaines IPSi (Interface Physique Signaux-Images), IMOVl (Images MOdèle et Vision), SIBIOM (Signaux et Images BIOMédicaux)). Plus récemment les EC de l'unité (thème Electromagnétisme) ont contribué à la création du **Master de Modélisation de Systèmes et Phénomènes Physiques (MSPP)** de l'université Cheikh Anta Diop de Dakar Sénégal (resp. F. Zolla), couvrant les départements de Physique, de Chimie, de Mathématiques et d'Informatique, et prochainement de Médecine. AMU, via l'UFR Sciences, fournit plus de 250 heures d'enseignements, 8 séjours d'échanges d'EC ainsi que 9 séjours d'étudiants de M2 en France dans ce Master.

Enfin, nous comptons au sein de l'I. Fresnel des participations à diverses fonctions essentielles de l'organisation des tutelles au sein du site et au-delà (AMU, CNRS et ECM, Institut CARNOT STAR) (voir Section D2R1).

## 4- PRISE EN COMPTE DES RECOMMANDATIONS DU PRÉCÉDENT RAPPORT

Les recommandations du précédent rapport sont résumées en rouge.

**Critère 1 : qualité et production scientifiques.** Le comité soulignait la présence de chercheurs dont les thématiques manquent de soutien contractuel, et recommandait le positionnement plus clair des activités au niveau international et des relations inter-thèmes. Ce quadriennal a montré que les chercheurs travaillant sur les thématiques paraissant comme isolées peuvent être sources de nombreux projets et productions scientifiques

en collaboration avec des laboratoires extérieurs. Par ailleurs l'unité s'efforce de soutenir les activités menées par un faible nombre de chercheurs, notamment pour les activités relevant d'une recherche fondamentale au plus haut niveau, qu'il est essentiel de maintenir (fonds de soutien, voir Section D1R1, efforts de recrutements). Enfin les équipes de petits effectifs sont tout autant opérationnelles et incluses dans des thèmes où elles évoluent en interaction avec l'ensemble des chercheurs, comme l'attestent les relations inter-équipes et inter-thèmes actuellement en cours autour de publications et projets communs (voir Section R2D3).

**Critère 2 : rayonnement et attractivité académiques.** Le comité soulignait la disparité de rayonnement au niveau international entre les thèmes et le nombre limité de projets européens. Un grand nombre de projets EU ont été soumis pendant la période, les activités les plus appliquées étant clairement plus financées par ce type de projet (voir Section D2). Le nombre de conférences invitées est important, y compris pour les activités les plus fondamentales (voir Sections dédiées aux thèmes).

**Critère 3 : interactions avec l'environnement économique, social, culturel et sanitaire.** Le comité soulignait le faible montant de financements industriels mais recommandait de pas disperser les recherches par les activités de prestations. Le comité soulignait également la disparité de contribution des thèmes à la diffusion grand public. La part de ressources industrielles/valorisation dans les ressources propres a augmenté (de 11% à 19%). L'unité veille à garder un équilibre entre activités de prestation pure et projets de recherche, en préservant une modalité qui profite au développement d'activités de recherches plus fondamentales. La mutualisation des compétences technologiques au travers de la plateforme *Photonique* illustre la volonté de l'I. Fresnel d'exploiter et faire rayonner ces spécificités locales au travers d'une communication globale et concertée des opportunités (voir Section D2R4). Par ailleurs, l'unité poursuit une politique d'augmentation du parc d'équipements pour mieux gérer cet équilibre et le maintenir via des financements (type Equipex+, CPER, projets Région plateformes...). Le laboratoire a enfin augmenté ses capacités en termes d'activités de transfert technologique, brevets, logiciels ouverts et création de startup. Par ailleurs, l'unité a montré une activité grandissante en communication scientifique et grand public, impliquant tous les thèmes (voir Section D4).

**Critère 4 : organisation et vie de l'unité.** Le comité recommandait d'affiner l'articulation des thèmes et équipes en renforçant le caractère opérationnel des thèmes, leur rôle dans la gouvernance et leur valeur ajoutée scientifique. Le comité soulignait également un déséquilibre de ressources propres entre les thèmes. Le rôle des thèmes dans la politique scientifique et leur articulation avec les équipes sont aujourd'hui établis et explicités dans l'introduction de ce document. Un équilibre s'est installé entre la structuration entre thèmes et équipes, l'équipe plus proche de l'individu permettant l'opérationnalité au quotidien alors que le thème permet l'élaboration de la stratégie scientifique. Ce fonctionnement est positif et parfaitement assumé par tous les membres de l'unité. La répartition des ressources propres est explicitée dans la Section D1, les disparités étant issues des différences entre les thématiques scientifiques portées par les thèmes ainsi que leurs effectifs.

Le comité soulignait la nécessité de mettre en place une information générale aux nouveaux entrants. Le comité soulignait également le faible ratio ITA : chercheurs/enseignant chercheur (0.24). Il soulignait également le faible nombre de recrutements, le relativement faible nombre de promotions et une disparité dans les formations. Le comité d'experts recommandait enfin la mise en place d'un comité de pilotage régulier entre l'Unité et ses tutelles. La plupart de ces points (journée des nouveaux entrants, recrutements EC/C, formations, promotions) ont montré de fortes progressions qui sont explicitées dans les sections dédiées. Pour des raisons principalement contextuelles, les promotions EC restent en faible nombre, et le nombre de personnels ITA reste malheureusement très faible. De nombreux CDDs sont mis en place pour contourner ce problème, cependant au dépend du maintien pérenne des savoir-faire, notamment sur les instruments.

**Critère 5 : implication dans la formation par la recherche.** Le comité soulignait des hétérogénéités dans la répartition des doctorants au sein des thèmes et la nécessité de mettre en place des initiatives pour l'animation et le suivi des doctorants. Un point de vigilance était signalé sur le suivi et l'orientation doctorale des doctorants relevant des sciences de la vie et sciences médicales. Le problème du recrutement de doctorants sur les thématiques les plus théoriques reste important, essentiellement par le manque d'opportunités de recrutement et de candidats. Cependant, un effort conséquent est effectué dans le sens du couplage avec des thématiques plus appliquées, et par une augmentation de la soumission de projets dans les périmètres du site (Instituts d'établissements, A\*Midex...). L'unité a fortement incité les doctorants à générer un espace d'échanges qui leur est propre (séminaires internes doctorants, Optica Student chapter...), tout en stimulant les interactions scientifiques (participations aux séminaires en tant que présentateurs) (voir Section D2R2). La mise en place des comités de thèse a permis une vigilance accrue sur les abandons potentiels et des soutiens ont été mis en place pour prolonger les thèses les plus affectées par la crise sanitaire (voir Section D2R2). Enfin l'unité n'est pas rattachée à l'ED62 (faible effectif de chercheurs relevant des sections Science de la Vie), cependant les chercheurs HDRs concernés sont rattachés à cette ED et leurs doctorants s'y inscrivent.

**Critère 6 : perspectives et stratégie scientifique à cinq ans.** Il était recommandé une attention sur les risques de difficultés de développements en biologie et de certaines thématiques du thème 3 « information et photonique » dont le contour scientifique était perçu comme moins ciblé. Le comité recommandait d'approfondir la stratégie d'intégration de l'équipe imothep. Il a enfin été mentionné l'opportunité d'une évaluation à mi-parcours par un comité externe. Ces points sont explicités dans la Section D3 dédiée aux thèmes. Les thématiques du thème Information et Photonique montrent des axes forts et établis, en interaction

avec les autres thèmes, comme l'attestent les nombreux travaux communs avec les thèmes Imagerie et Nanophotonique et Composants. Une stratégie orientée vers les applications offre des opportunités de nouvelles directions de recherche où les aspects numériques et de la théorie du signal sont clés, comme la co-conception. Les domaines interdisciplinaires ont montré une progression importante (thèses soutenues en ED62, journaux biologie/médical, activités plateforme, activités valorisation autour de la biologie moléculaire...). Les activités de l'équipe IMOTHEP se déclinent dans les thèmes Information et Photonique et Imagerie, tout en conservant une partie d'activités dans des domaines purement médicaux, reliés aux activités hospitalières de ses personnels, et des projets sont en cours avec des chercheurs du thème Nanophotonique et Composants autour de l'instrumentation TEP. Enfin, l'unité a pris la décision d'une évaluation systématique à mi-parcours par un comité externe (2015, 2020), qui sera reconduite en 2026.

## DOCUMENT D'AUTOÉVALUATION

### Domaine d'évaluation 1 : Profil, ressources et organisation de l'unité

#### Référence 1. L'unité possède des ressources adaptées à son profil d'activités et à son environnement de recherche.

**Profil d'activité.** L'activité de l'I. Fresnel couvre plusieurs domaines scientifiques du référentiel HCERES : sciences et technologies de l'information et de la communication, électromagnétique, photonique et systèmes, physique optique et lasers ; biologie cellulaire et du développement ; imagerie et technologies médicales, diagnostic, approches thérapeutiques, qui touchent aux défis sociétaux dont la santé, l'environnement, le spatial, et les nouvelles technologies. Ces domaines sont couverts par les quatre thèmes de l'unité : Modélisation Electromagnétique, Nanophotonique et Composants, Information et Photonique, Imagerie. Ces thèmes s'intéressent dans leur globalité au domaine des ondes (des rayons X aux micro-ondes en passant par l'optique et le THz), couvrant leur nature la plus fondamentale (modélisation, électromagnétisme, optique mathématique, optique quantique), les aspects liés à l'information et au traitement des signaux et des images, jusqu'à des applications en biologie, médicales ou industrielles (instrumentations optiques, métrologie, composants, imagerie nucléaire (TEP, scintigraphie monophotonique, théranostique), Imagerie par Résonance Magnétique IRM, ...). L'étendue de ces domaines scientifiques, visible dans la représentation des publications de l'unité (Figure 5), fédère néanmoins de nombreuses relations entre les thèmes et domaines de recherche, qui sont explicités en Section D3R2. Il est à noter que la structure de l'unité en thèmes est corrélée avec une augmentation du nombre de publications impliquant plusieurs équipes (par exemple entre modélisation et nanophotonique, modélisation et composants, numérique et imagerie, numérique et médical, composants et procédés lasers, ...), et des co-encadrements de thèses entre différentes équipes ou thèmes (voir Section D3R2).



Figure 5 : Thématiques scientifiques les plus fréquentes des publications de l'institut Fresnel (source ISI Web)

La structuration en thèmes a permis de mettre en avant quelques caractéristiques importantes de la nature des recherches menées actuellement à l'I. Fresnel, qui conditionnent les besoins en ressources humaines, financières et d'infrastructure :

- La nature variée de ces recherches. L'I. Fresnel regroupe des personnels travaillant sur des thématiques très fondamentales (mathématiques appliquées, modélisation, quantique) mais également très appliquées (bancs d'instruments d'optique, photo-acoustique et microondes, fabrication de composants, imagerie médicale). Cette coexistence est relativement singulière parmi les laboratoires français et à l'échelle internationale : elle est un atout qu'il faut préserver en tenant compte des spécificités de chaque domaine tout en favorisant les interfaces entre eux. Ceci n'est possible qu'avec un environnement adapté (voir Section D1R2).
- Sa capacité à faire évoluer et hybrider de manière constructive les aspects du numérique avec les aspects théoriques et instrumentaux. Les savoir-faire de l'unité en théorie du signal, traitement des images, intelligence artificielle, optimisation, calcul scientifique, sont un grand atout pour les recherches menées dans divers domaines à l'I. Fresnel, conférant une avancée non négligeable à une période où le numérique prend une place grandissante. On peut citer par exemple des liens actifs entre numérique et simulation/modélisation, entre numérique et optimisation de la conception et fabrication de composants, entre numérique et instrumentation pour la co-conception en caractérisation, imagerie et nanophotonique. Cette hybridation accrue bénéficie de la présence de deux personnels IT spécialistes en informatique, calcul numérique et traitement des images, mais elle nécessite une attention particulière sur les ressources en RH, matériel informatique et en gestion des codes et des données.
- Son caractère interdisciplinaire, couvrant la physique, l'informatique, les mathématiques, et plus récemment la biologie et le biomédical. La volonté de l'Institut Fresnel d'intégrer en 2015, dans ses murs, un savoir-faire en biologie pour intégrer au plus près les questions posées par les outils d'imagerie de demain en biologie a considérablement augmenté les capacités des développements en instrumentation. S'est ajoutée en 2018 une activité en médical avec l'intégration de l'équipe IMOTHEP en imagerie nucléaire travaillant en étroite relation avec les numériciens des traitements des images à l'Institut Fresnel. A ces activités viennent s'ajouter un effort important dans le développement de méthodes médicales optiques et photo-acoustiques de détection et d'imagerie dans les tissus, et d'antennes pour l'imagerie IRM fort champs (en collaboration avec le CRCM). Cette étendue du savoir-faire d'une instrumentation au plus près des problématiques posées par les disciplines voisines au sein du laboratoire est un atout pour l'unité, cependant il nécessite une attention sur la cohérence de la croissance des activités en biologie et en biomédical qui relèvent de sections CNRS/CNU plus éloignées que la majorité des personnels de l'unité.
- Son périmètre intersectoriel, couvrant de nombreux contrats et collaborations industriels, voire plus récemment de transfert industriel et création d'entreprise, mais également pour certains axes, en lien direct avec l'hôpital. L'activité des plateformes bénéficie notamment de la présence de domaines de recherche innovants et offre aux thématiques de recherche des ouvertures vers les opportunités appliquées. L'accroissement des activités de valorisation a nécessité une démarche active de l'unité pour la gestion des ressources associées, notamment en locaux et ressources humaines.

**Ressources humaines.** Les effectifs de l'unité répartis par catégories et par thèmes / services communs, sont donnés dans le Tableau 1. Tous les thèmes ont recruté des doctorants, CDDs/Postdoctorants et personnels permanents pendant la période de référence (le recrutement ITA/IATSS étant supérieur dans les services communs), et ont bénéficié de promotions pour les personnels. Les différences entre thèmes sont discutées dans la Section D3 dédiée aux thèmes.

	Modélisation Electromagnétique	Nanophotonique et Composants	Information et Photonique	Imagerie	Services Communs
<b>Nombre au 31/12/2021</b>	4 Doctorants	22 Doctorants	14 Doctorants	23 Doctorants	3 CDDs
	0 CDDs/postdocs	13 CDDs/postdocs	8 CDDs/postdocs	16 CDDs/postdocs	
	12.8 EC/C	20.3 EC/C	13.1 EC/C	22.8 EC/C	14 ITA/IATSS
	1.3 ITA/IATSS	3 ITA/IATSS	3 ITA/IATSS/APHM	9.8 ITA/IATSS/APHM	
<b>Départs sur la période</b>	13 Doctorants	29 Doctorants	27 Doctorants	29 Doctorants	10 CDDs
	8 CDDs/postdocs	35 CDDs/postdocs	11 CDDs/postdocs	37 CDDs/postdocs	
	2 EC/C	3 EC/C	0 EC/C	1 EC/C	6 ITA/IATSS
	0 ITA/IATSS	0 ITA/IATSS	0 ITA/IATSS/APHM	0 ITA/IATSS/APHM	
<b>Recrutements sur la période</b>	10 Doctorants	36 Doctorants	25 Doctorants	34 Doctorants	12 CDDs
	2 CDDs/postdocs	35 CDDs/postdocs	19 CDDs/postdocs	38 CDDs/postdocs	
	1 EC/C	0 EC/C	2 EC/C	4 EC/C	9 ITA/IATSS
	0 ITA/IATSS	1 ITA/IATSS	0 ITA/IATSS	0 ITA/IATSS/APHM	
<b>Promotions sur la période</b>	1 PU/DR	4 PU/DR	3 PU/DR	2 PU/DR	9 ITA/IATSS
	0 ITA/IATSS	1 ITA/IATSS	1 ITA/IATSS	0 ITA/IATSS/APHM	

**Tableau 1 : Répartition des effectifs de l'Institut Fresnel  
(la situation au 31/12/2021 prend en compte le % de participation aux thèmes)**

Les effectifs de l'unité sont en augmentation par rapport la période précédente pour toutes les catégories : 204 personnels au total dont 105 non-permanents au 31 décembre 2021, contre 168 dont 85 non-permanents en 2016 (Figure 6).

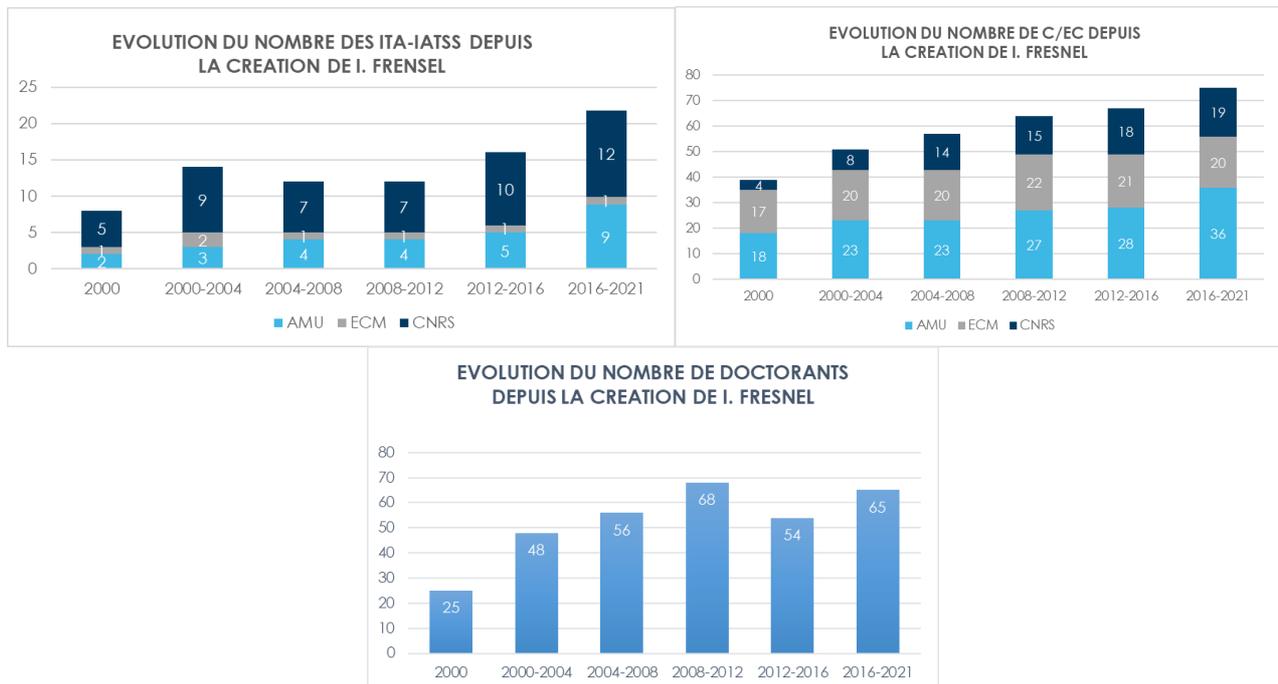


Figure 6 : Evolution des effectifs de l'institut Fresnel depuis sa création

**Evolution des effectifs sur la période.** Sur la période de référence (voir Figure 7), la catégorie C/EC est en augmentation malgré les départs en retraite et détachement (6 départs sur la période), la catégorie ITA/IATSS est stable depuis 2018 (6 départs ont été remplacés partiellement). Les augmentations visibles en 2018 sont majoritairement liées au rapprochement de l'équipe IMOTHEP. Durant la période de référence, l'unité a recruté 105 doctorants (contre 75 dans le quadriennal précédent), et 98 ont soutenu leur thèse (plus 6 abandons). Pendant cette période, l'unité a recruté 94 postdoctorants/CDDs (dont 12 CDDs services communs). Ces chiffres illustrent la complexité du recrutement RH, sachant que ces personnels non-permanents sont pour environ 2/3 des personnels étrangers.

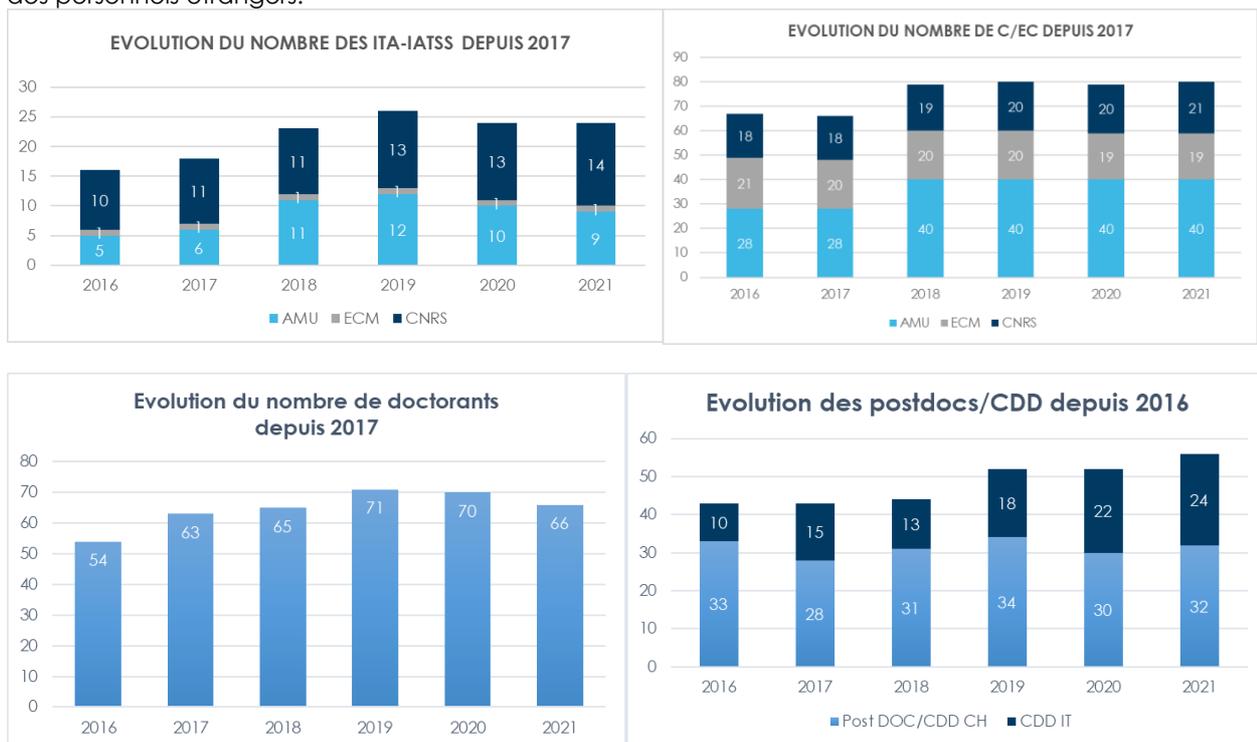


Figure 7 : Evolution des effectifs de l'institut Fresnel sur la période de référence

**Effectifs chercheurs/enseignant-chercheurs.** Durant la période de référence, l'unité a recruté 4 enseignants-chercheurs (1 MCF ECM en section 63, 1 PU ECM en section 63, 2 MCF AMU en section 61) et 4 chercheurs CNRS (3 en section 8, 1 en CID 54). Enfin, le rapprochement de l'équipe IMOTHEP a augmenté les effectifs de 4 enseignant-chercheurs reliés à APHM (1 MCUPH et 3 PUPH). Il est à noter que les recrutements d'enseignant-chercheurs sont uniquement conditionnés par les départs en retraite aujourd'hui. La répartition des EC/C au 31/12/2021, par sections CNRS ou CNU, est donnée dans le tableau suivant :

	CNRS 5	CNRS 7	CNRS 8	CNRS 22	CNU 28	CNU 30	CNU 61	CNU 63	CNU 43-01	CNU 49-01
EC/C	1	1	20	2	1	16	14	18	3	1

Durant la période de référence, 5 enseignants-chercheurs ont pu bénéficier de promotions de MCF à PU (2 PU ECM, 1 PU Polytech, 1 PU AMU UFR Science, 1 PUPH) ainsi que 6 chercheurs de CR à DR (4 en section 08, 1 en section 05 et 1 en section 54). Il est à noter que les promotions PR sont particulièrement difficiles aujourd'hui. Deux départs en détachement d'enseignant chercheurs ont eu lieu, un départ de chercheur, ainsi que 3 départs en retraite, enfin 2 PU sont en éméritat (ECM section 63).

**Effectifs ITA/IATSS.** Durant la période de référence, l'unité a recruté 3 ITAs sur concours externe (1 en BAP C, 1 en BAP E et 1 en BAP J associé au lancement du Master Europhotonics), et 7 ITA sur mobilité (1 FSEP IE BAP C, 4 BAP J et 2 BAP E). Les départs ont concerné 4 BAP J (en gestion, RH et administration, AMU ou CNRS) et 1 BAP C (Electronicien AMU) (2 en retraite, 2 en mobilité). Au cours de la période, 8 promotions ou avancements d'ITA/IATSS ont été obtenus, dont 3 passages TECH – AI et 2 passages IR – IRHC. Au 31 décembre 2021, la répartition par branche d'activité professionnelle (BAP) est la suivante : 5 BAP J (contre 6 en 2016), 8 BAP C (contre 6 en 2016), 5 BAP E (contre 2 en 2016), 1 BAP F (stable), 1 BAP G (stable), 1 BAP A (stable).

Certains points sont à signaler :

- Globalement, le nombre de personnels ITA/IATSS est faible (ratio de 0.23 par enseignant-chercheur/chercheur, contre 0.24 lors de la période précédente). Ce faible ratio est encore plus accentué pour les fonctions de soutien à la recherche : 0.12.
- Le service informatique est en sous-effectif compte tenu des besoins grandissants en maintenance et organisation des machines de stockage et de calcul, visant à structurer un besoin complémentaire des structures mutualisées sur AMU (voir plus bas).
- Le service RH est en sous-effectif compte tenu de l'augmentation en nombre et en complexité des dossiers de recrutements. Ce besoin est comblé actuellement par un CDD temps partiel (financé sur prélèvement contrats).
- Le service gestion financière (4 personnes) est régulièrement en flux tendu compte tenu du nombre et de la typologie des contrats à gérer, la stabilisation d'un du poste CDD actuel par un concours IATSS AMU prévu en 2022 permettra de stabiliser le service. Il est à noter que ce poste ne permet de remplacer qu'un départ à la retraite ITA AMU sur deux.
- Malgré l'arrivée récente d'une IR BAP C, les activités plateforme sont encore en sous-effectifs IT. Ces activités sont aujourd'hui majoritairement couvertes par des CDDs (voir Section D2R4).
- L'activité « biologie » du laboratoire va pouvoir se déployer davantage à partir de 2022 avec la mobilité (FSEP CNRS) d'un AI BAP A (arrivée prévue Juin 2022).
- L'activité de mécanique (1 temps partiel, 1 départ en retraite prévu en 2022) est en cours de réorganisation, notamment par le déploiement d'imprimantes 3D et d'une machine à commande numérique mieux adaptée à l'activité. Cependant la baisse prévue des effectifs sur la prochaine période fragilisera ce service.

**Pyramide des âges, ratios H/F.** L'âge moyen des personnels permanents du laboratoire est en augmentation (48.5 ans contre 41.7 ans lors du quadriennal précédent). La proportion de femmes est de 27% chez les personnels permanents (35% chez les ITA/IATSS), et de 30% chez les non permanents (26% chez les doctorants) (Figure 8).

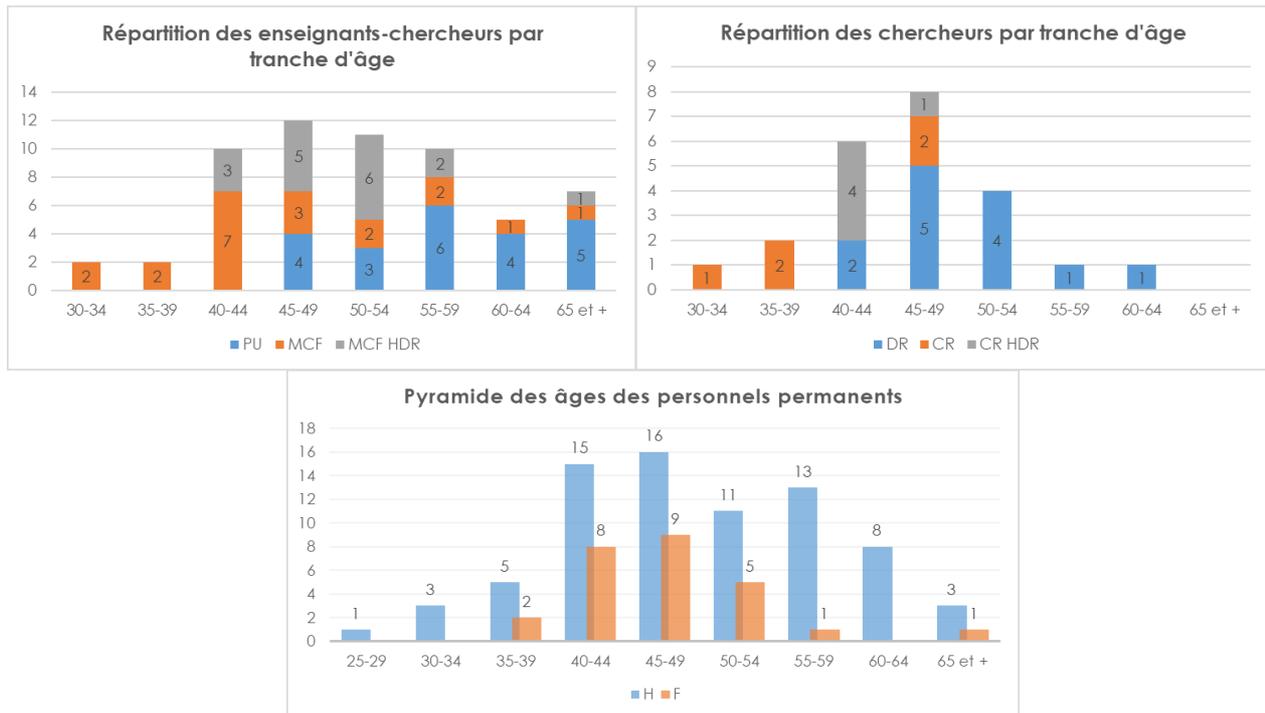


Figure 8 : Pyramide des âges des effectifs de l'institut Fresnel au 31/12/2021

**Ressources financière.** Le budget consolidé de l'unité en 2021 est de 6 279 000 € HT (hors reports), se répartissant en 443 000 € de dotations des établissements (7% du budget consolidé) et de 5 836 000 € de ressources propres (93%). Par ailleurs la masse salariale des personnels fonctionnaires d'état de l'unité représente 7 124 000 € sur 2021.

**Dotations.** La répartition des dotations par tutelle et des ressources propres par tutelle gestionnaire sont représentés en Figure 9. Notons que dans la somme de la dotation CNRS une participation au fonctionnement de l'espace photonique (salles blanches de la plateforme *Photonique*) de l'ordre de 15 k€ par an est incluse au titre du soutien des centrales de proximité.

L'utilisation de cette dotation s'est répartie de la manière suivante (chiffres 2021, représentatifs de la période) : 37% de la dotation (~ 160 k€) est versée aux équipes sous forme de point chercheur (2 k€ par an par personnel de la recherche, avec un bonus de 2 k€ supplémentaires pour les nouveaux arrivants). 21% de la dotation (90 k€) est destinée à soutenir les projets scientifiques des chercheur(se)s. Depuis 2021, le soutien se fait sous la forme : (1) de « fonds de soutien » (70k€) versé par appel à projet interne en début d'année (celui-ci finance typiquement 8 projets arbitrés par un comité constitué de la direction et des responsables de thèmes), et (2) de « fonds collectifs » (20k€) versés au fil de l'eau, sur demande à la direction, aux personnels nécessitant un besoin urgent pour financer typiquement un complément d'équipement, un stage, ou une mission (avant 2021 seuls les fonds de soutien existaient, à hauteur de 90k). Les nouveaux arrivants ont de fait accès aux fonds en priorité, le fonds de soutien étant un acquis indispensable au démarrage d'une activité. Ce fonds de soutien permet de mener une politique en faveur d'activités collectives de recherche et d'émergence de thématiques novatrices non encore financées par des appels d'offres. Enfin, 4 k€ sont destinés à l'animation des séminaires des thèmes de l'unité, les séminaires généraux étant financés sur le budget du laboratoire. Le reste de la dotation est destiné au fonctionnement général du laboratoire, à une partie des coûts de fonctionnement de l'espace photonique (5-10 k€ par an), et à des dépenses en infrastructure (40-60 k€ par an) dont le montant est variable suivant les années, et en dépenses de ressources logiciels informatiques (interfaçage, calcul scientifique, ~5 k€ / an).

Enfin, certains coûts d'infrastructure sont pris en charge exclusivement par Aix-Marseille Université en tant qu'hébergeur de l'unité : fluides, frais d'entretien des locaux, et prise en charge de certains contrats d'entretien de l'espace photonique.

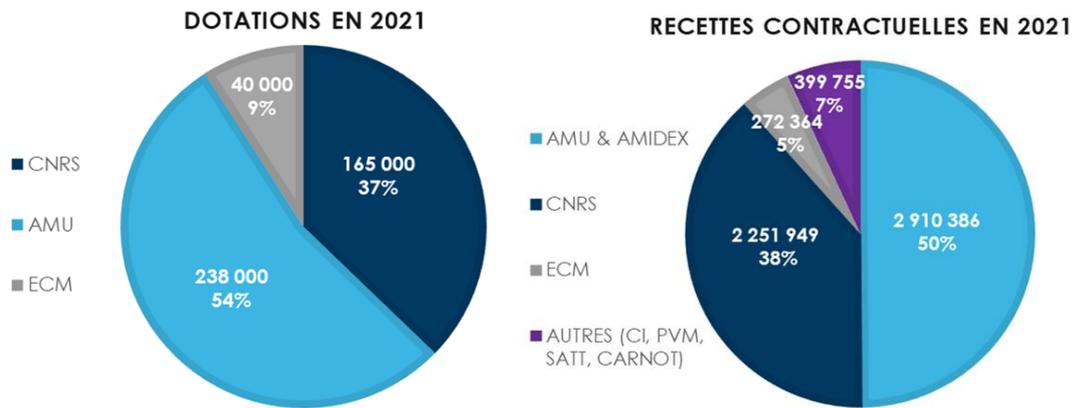


Figure 9 : Répartition des dotations et recettes contractuelles de l'I. Fresnel en 2021 par tutelle

**Ressources propres.** La répartition des ressources propres par tutelle (Figure 9) sera progressivement déplacée vers une plus grande proportion de projets gérés CNRS suite à l'établissement d'une gestion unique actée en 2021. La répartition par type de sources de financement est représentée en Figure 10. En moyenne sur la période, les ressources propres annuelles sont constituées d'environ 1.730 M€ de contrats nationaux, 1.770 M€ de contrats Européens et Internationaux, de 520 k€ de contrats régionaux et 740 k€ de contrats de valorisation et de collaborations industrielles. Ce sont majoritairement les contrats Européens (31%) et ANR (21%) qui constituent ces ressources. La contribution 'valorisation' est en progression importante depuis le dernier quadriennal, les contrats liés à des activités de maturation et de collaborations industrielles représentent à eux seuls environ 400 k€ sur l'année 2021 (10%), signifiant l'importance portée par les chercheur(se)s à la maturation des technologies développées à l'Institut Fresnel. En outre, un prélèvement de 4% sur les contrats lorsque ceci est possible est effectué afin de constituer une base budgétaire suffisante (~ 70 k€ par an) pour le financement de CDDs gestion financière et soutien RH. Il est à noter que la gestion unique CNRS impose une complexité grandissante pour la gestion des contrats adossés à AMU ou A\*Midex (PIA, appels d'offres spécifiques types Instituts d'Établissement), qui demande souvent de faire appel à des dérogations de la part du CNRS alors que celles-ci sont destinées à être délivrées à titre exceptionnel.

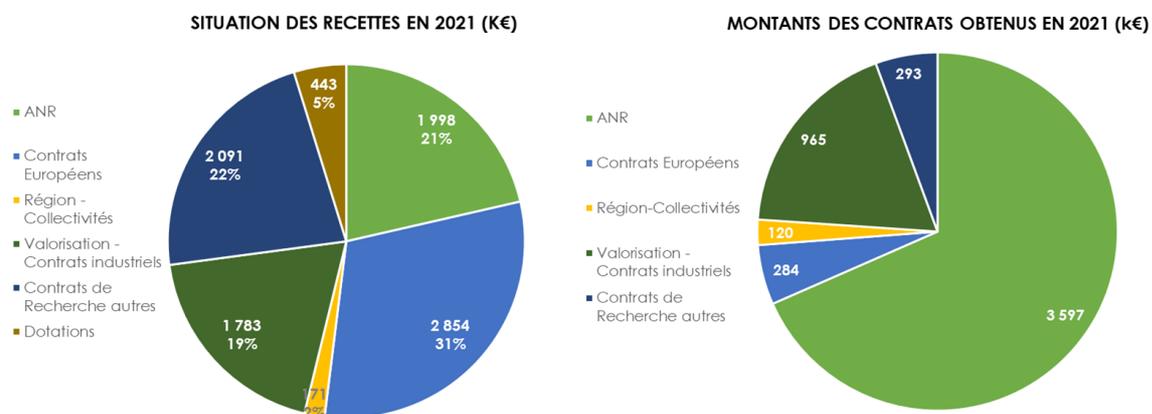
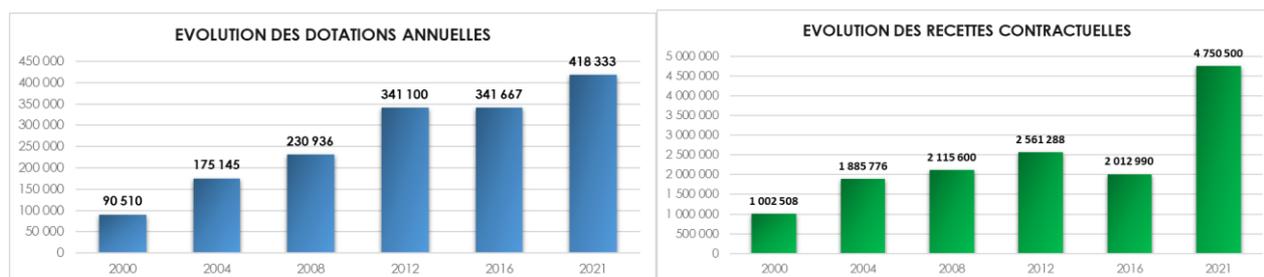


Figure 10 : Nature des ressources propres. A gauche : situation au 31/12/2021 (seuls les montants ouverts en gestion sur 2021 sont donnés, reports inclus). A droite : totalité des montants des contrats obtenus en 2021.

**Evolution temporelle.** La Figure 11 montre l'évolution dans le temps sur les quadriennaux précédents, de la dotation et des ressources propres. Depuis la création d'Aix-Marseille Université en 2012, la dotation AMU a légèrement augmenté, et les ressources propres continuent de croître de manière significative, allant de pair avec une augmentation des effectifs. L'augmentation du nombre de contrats européens et de valorisation obtenus pendant la période de référence et le projet PIA/ANR Equipex+ IDEC (2.3 M€) obtenu en 2021 expliquent l'augmentation importante visible sur le dernier quadriennal. Les politiques menées par le site étant actives dans l'incitation au dépôt de projets EU et à la valorisation des recherches, les personnels des domaines concernés sont désormais sensibilisés à ce type de financement des recherches.



**Figure 11 : Evolution des dotations annuelles et recettes contractuelles depuis la création de l'I. Fresnel**

**Ressources locaux.** Les locaux de l'institut Fresnel sont répartis en 5 866 m<sup>2</sup>, soit 2 913 m<sup>2</sup> de bureaux/locaux administratifs (salles de réunion, salle cafétéria) et 2 353 m<sup>2</sup> de locaux expérimentaux. Parmi ceux-ci, 1 031 m<sup>2</sup> sont destinés à des activités de plateforme (dont 320 m<sup>2</sup> de salle blanche). En supplément de ces locaux, des espaces (3 salles d'expériences) sont destinés à héberger des expériences pour le biomédical à CERIMED, et une chambre anéchoïque (environ 100 m<sup>2</sup>, hauteur 8.5 m) est actuellement hébergée au laboratoire IUSTI (technopole Château Gombert). Pour la gestion des bureaux, le choix a été fait de mutualiser les espaces bureaux des non-permanents à partir de 2018, système opérationnel désormais, qui permet les rencontres inter-équipes de ces personnels. Le nombre grandissant de besoins en m<sup>2</sup> d'espaces expérimentaux mène aujourd'hui à une situation relativement tendue car il n'est pas possible d'envisager une augmentation importante de ces activités (arrivée de projets d'envergure, augmentation des activités plateformes et notamment accueil de partenaires ou utilisateurs extérieurs), ni l'accueil de nouvelles équipes, alors que les opportunités sur le site de Marseille sont importantes pour cela (en 2021, l'unité a encore proposé deux candidats à des chaires d'excellence A\*midex).

**Ressources logiciels et matériel informatique.** L'unité mène une politique de gestion des logiciels et matériels informatiques adaptée aux activités, en hybridant des actions communes (achats de logiciels grand nombre d'utilisateurs lorsque ceci est financièrement accessible, avec éventuellement partage avec d'autres unités voisines, achat de serveurs de stockage communs, hébergement maintenance et gestion par le service informatique) et des actions propres aux projets. Le service informatique gère également le contact avec les structures extérieures (datacenter, mésocentre), l'intranet « ressources informatiques », ainsi que l'hébergement sur gitlab (<https://gitlab.fresnel.fr/>) des codes open source (5 codes sur la période de référence). Pour des simulations nécessitant une puissance de calcul dépassant les capacités internes de l'institut Fresnel, le mesocentre d'AMU est régulièrement utilisé. Cela s'effectue le plus souvent par l'accompagnement des chercheurs par l'équipe informatique lors du dépôt de projet et de l'utilisation courante des machines du mesocentre d'AMU. A titre d'exemple, on peut mentionner les projets suivants qui tirent parti des moyens de calculs du mesocentre : études de surfaces rugueuses par la méthode des moments (projet B 5e5 h cpu), modélisation de sondages électromagnétiques d'astéroïdes (demande A 5000h cpu et B 1e6 h cpu), éléments finis pour l'optique non linéaire (projet A 5000h cpu), simulation monte-carlo pour la diffusion de la lumière (proche infrarouge) dans des tissus biologiques fortement diffusant (projet A 5000h cpu). Enfin l'unité participe également à deux projets en phase d'installation : le projet CEDRE (<https://cedre.univ-amu.fr/>, pour la formation et le soutien à la gestion de données de recherche), et l'Equipex+ 4D-OMICS (porté par Université Côte d'Azur, dont AMU est partenaire) visant à construire un instrument numérique, en région Sud, pour la biologie quantitative multi-échelle.

## Référence 2. L'unité s'est assigné des objectifs scientifiques, y compris dans la dimension prospective de sa politique.

La politique scientifique du laboratoire s'inscrit à plusieurs niveaux, qui impliquent (1) les personnels dans leur ensemble, (2) les responsables opérationnels (des projets, des équipes) et (3) les représentants des thèmes. Le fonctionnement décisionnel s'est affiné lors des quelques années qui ont suivi la création des thèmes (2017). Désormais les discussions menées au sein des thèmes et dans les équipes définissent de manière collective des choix scientifiques remontés vers la direction lors de plusieurs réunions annuelles entre responsables d'équipes, représentants de thèmes et direction. Ces réunions permettent une discussion transparente et ouverte sur les besoins et la politique scientifique associée, permettant de définir les grandes lignes des objectifs scientifiques majeurs du laboratoire. Ceux-ci permettent de mettre en avant des directions de recherche soit émergentes, soit nécessitant de consolider les effectifs sur des sujets encore très actifs à grande échelle mais souffrant du départ de personnels.

Nous pouvons identifier quelques axes illustrant le travail commun des personnels pour la définition de cette stratégie scientifique collective :

**Définition de projets internes financés sur dotation du laboratoire et soutiens ponctuels à la recherche.** Ces projets « fonds de soutien » (typiquement 15 k€/projet sur un an) sont proposés par les personnels sur un appel d'offre annuel dans lequel le comité de sélection est constitué des représentants de thèmes et de la direction. Ces financements (matériel, missions ou stages) permettent de soutenir des études préliminaires à des projets conséquents sur des thématiques émergentes, des démarrages de collaborations, des soutiens à la réalisation d'étapes essentielles sur des projets en cours, et enfin, de manière prioritaire, les projets des jeunes chercheurs récemment recrutés. Depuis 2020, une partie de la dotation appelée « fonds collectifs » (enveloppe annuelle 20 k€) est destinée à soutenir des besoins ponctuels des EC/C/IT au fil de l'eau comme des prolongations doctorants et missions.

**Sélection des candidats soutenus au concours Ecole Doctorale 352** (Physique et Science de la Matière) : depuis 2020, un concours est organisé en interne par l'unité, permettant de pré-sélectionner les candidats auditionnés par l'Ecole Doctorale pour la sélection finale. Typiquement 10 candidats sont présentés chaque année par les EC/C. Le comité de sélection est composé des responsables d'équipes, des représentants de thèmes, et de la direction (hors personnels impliqués dans les projets ED). Ce concours s'effectuait, avant 2020, uniquement par l'ED sur une dizaine de dossiers présentés par l'unité.

**Animation et cadres de réflexion scientifique collective.** Les séminaires de l'I. Fresnel sont organisés par les représentants de thèmes à raison d'un séminaire par semaine (un thème par mois). Le format le plus récent inclut des sessions où présentent plusieurs doctorants de l'unité. Quelques actions collectives sont mises en place par ailleurs pour stimuler les réflexions autour de thèmes bien spécifiques. A l'instar des ateliers scientifiques organisés en 2015 pour la création des thèmes, nous avons poursuivi récemment cette démarche qui prend la forme d'ateliers (sur une journée), par exemple autour de la manipulation et l'imagerie de phase (2021), ou la thermique. Des réunions régulières thématiques sur une longue durée ont également lieu, comme les cafés scientifiques sur les méthodes numériques d'inversion (2018-2019). Enfin un **groupe de travail s'organise autour de l'intelligence artificielle (IA) à l'I. Fresnel**, motivé par l'émergence de techniques d'apprentissage profond et la rupture scientifique associée, sur la dernière décennie. Ce groupe, transversal à l'ensemble des thèmes de recherche du laboratoire, s'est fixé comme objectif de développer la connaissance générale et l'appropriation d'outils d'IA à l'institut Fresnel. Un sondage auprès des personnels du laboratoire a révélé un intérêt certain pour les techniques émergentes, notamment celles basées sur les réseaux de neurones et cela pour des raisons diverses (performance, intérêt dans les publications et appel à projets, quantité des données d'étude, exploration des interactions entre physique et intelligence artificielle, ...). Un groupe de réflexion sur cette thématique a ainsi vu le jour en 2020 et s'est fixé trois objectifs qui doivent permettre d'anticiper comment les thématiques du laboratoire peuvent évoluer, à court et moyen terme, sous l'effet croissant des techniques d'IA : (1) veille scientifique (répertorier les travaux en IA ou s'appuyant sur l'IA de l'unité, principalement dans le thème Information et Photonique ([Pan21, Fou21]) ; identifier et communiquer les travaux extérieurs en IA potentiellement utiles ; faire « monter en compétence » les personnels qui le souhaitent sur des outils d'IA via une page interne de ressources de formation en ligne (Wiki <https://gitlab.fresnel.fr/wojak/ia-fresnel/-/wikis/IA-Fresnel-WIKI>) (cours, mooc, etc.) et par la communication des formations offertes par les instituts d'établissement ; diffusion scientifique par des séminaires internes et externes sur l'IA. Ce groupe de travail et les activités scientifiques autour du numérique en général sont également représentés dans la commission informatique pour contribuer aux questions organisationnelles et pratiques dans l'unité. Certains des travaux en IA ont pu être menés grâce à l'acquisition en 2018 par le fond pour la science d'une machine GPU dédiée aux calculs en Deep Learning.

**Démarches collectives pour la valorisation et les plateformes.** La décision d'une création de plateforme commune *Photonique* regroupant couches minces, imagerie et caractérisation est issue d'une réflexion menée en 2020 par les acteurs de différents thèmes impliqués dans la valorisation, actant l'opportunité de regrouper certains instruments développés en imagerie et caractérisation, suffisamment matures pour être ouverts à des utilisateurs extérieurs (voir Section D4). De manière similaire, le projet Equipex+ IDEC Imagerie et Détection Computationnelles (2021) est issu d'une réflexion collective sur les savoir-faire acquis dans l'unité en matière de couplage entre outils numériques et instrumentation. Des équipements ont été proposés par 3 équipes (au sein de trois thèmes) pour être ouverts à la communauté très variée (voir Section D2R3).

**Organisation d'évènements communs.** Quelques actions couvrant des colloques scientifiques ont impliqué plusieurs thèmes ou plusieurs équipes d'un thème, afin de créer une dynamique autour d'un domaine scientifique. Ces évènements sont ouverts à l'extérieur ou pas (voir Section D2R1).

**Définition des priorités lors des campagnes d'emploi.** Devant le constat d'un très faible taux de recrutements d'ECs, il a été fait le choix depuis un an de construire des profils larges issus de réflexions au sein des équipes et thèmes, qui couvriraient soient des thèmes spécifiques, soit des interfaces entre deux thèmes. Ces objectifs sont aujourd'hui les suivants : (1) en *Modélisation Electromagnétique*, prendre part aux développements très rapides du domaine des « nouveaux matériaux » (métamatériaux, métasurfaces, photonique topologique, matériaux fortement non-linéaires) au niveau international. Ce projet est au cœur d'une thématique forte de longue date

de l'I. Fresnel centrée sur des approches mathématiques, physiques et computationnelles dédiées, éventuellement reliées à des composants photoniques innovants. Les problématiques principales sont l'étude des dispersions fréquentielle et spatiale, non-linéarités spatiales, absorption, résonances de scattering, et propriétés effectives des matériaux structurés (homogénéisation non asymptotique) ; (2) en *Nanophotonique et Composants*, capitaliser sur la dynamique actuelle des développements technologiques pour concevoir et fabriquer des composants optiques nanostructurés innovants, pour la manipulation spatiale et/ou spectrale des ondes, optiques, microondes-RF ou THz. Ces directions impliquent la conception théorique et la modélisation, la fabrication et la caractérisation de systèmes aux fonctionnalités nouvelles où la manipulation des ondes en champ proche est un élément majeur d'innovation. Les avancées portent sur les matériaux (reconfigurables, bidimensionnels, métaux et alliages, diélectriques et semiconducteurs...) et sur des applications en nanophotonique, métasurfaces, capteurs, plasmonique, photonique topologique. Par ailleurs, l'unité souhaite étendre ses travaux dans le domaine de l'optique et de l'information quantique, possiblement en lien avec la nanophotonique ; (3) en *Information et Photonique*, développer des directions nouvelles dans le domaine de l'imagerie et du diagnostic depuis la physique de méthodes innovantes jusqu'au traitement du signal et des images en passant par la co-conception de systèmes d'imagerie, en collaboration avec les domaines de l'instrumentation et des sciences appliquées. Le projet inclut le traitement de l'information et plus généralement en data-science (ressourcement), le traitement de données massives ou fortement bruitées, ou le développement de nouvelles techniques d'intelligence artificielle (Machine Learning, Deep Learning,...), en particulier pour des applications utilisant des capteurs de nouvelles générations ; (4) en *Imagerie*, développer des méthodologies instrumentales et computationnelles innovantes dans le domaine de l'imagerie et du sondage, des rayons X au micro-ondes en passant par la microscopie et l'endoscopie optique. Le projet vise à développer de nouveaux instruments en reliant modélisation physique, traitement numérique de l'information (inversion, optimisation, reconstruction, possiblement en temps réel), et expérimentation, couvrant des applications larges en tomographie micro-onde et optique, microscopies de phase, non-linéaires et de fluorescence avancées, ptychographie X et optique, et sondage dans les domaines infrarouge thermique et THz.

**Projets interdisciplinaires, inter-équipes et inter-thèmes.** Sur la période, plusieurs projets d'envergure impliquent plusieurs équipes ou plusieurs thèmes, en hybridant approches expérimentales, théoriques et numériques (voir Section D3R2). Nous donnons ici quelques exemples concrets de projets financés qui attestent de ces approches interdisciplinaires entre thèmes ou intra-thèmes : projet ERC 3DBioMat (reliant instrumentation rayons X et optique, approches numérique de reconstruction et biologie de la biominéralisation) ; projets EU MCUBE et M-ONE et chaire Industrielle Multiwave (reliant modélisation, composants et applications médicales) ; Chaire d'Excellence A\*Midex M. Alonso (ECM)(reliant mathématiques, théorie de l'information et optique expérimentale) ; projet EU ITN GREAT (impliquant modélisation, composants et procédés lasers) ; projet Equipex+ IDEC (valorisant les instruments de co-conception avec les approches numériques) ; deux projets de thèse CNRS 80Prime (entre composants, imagerie, modélisation et approches numériques), et enfin de nombreux projets ANR reliant modélisation et nanophotonique ou instrumentation et numérique. Les thématiques couvertes par les trois laboratoires communs et deux laboratoires internationaux sont également signes de rapprochements importants entre les thèmes (voir Section D4).

**Projet de l'unité.** Le projet scientifique écrit en préparation de la visite du comité externe en 2020, a été complété (voir Annexe 1). Ses lignes directrices permettent de positionner le laboratoire comme porteur de directions réfléchies impliquant souvent des contributions collectives et de taille importante, mais également innovantes et compétitives au niveau international. Certains de ces projets concernent l'incorporation de nouveaux outils originaux et uniques dans les plateformes et les plateaux techniques. Les personnels s'investissent également dans les projets de formation, via les Masters (voir Introduction) et dans les projets nationaux en cours comme le plan QuantEdu-France sur les technologies quantiques, regroupant 16 écoles et universités dont AMU et ECM.

Dans le futur, des directions générales sont définies dans les lignes citées plus haut mais également autour de projets d'ores et déjà financés : ERCs StG 2022 TEXTOM (imagerie de texture dans l'os par rayons X cohérente pour la compréhension biomécanique de pathologies) et AdG 2022 SpeckleCARS (approches numériques et instrumentales pour l'imagerie biomédicale champ large vibrationnelle sans marquage), et en tant que partenaire, ERC AdG 2022 Dust2Planet (expériences d'analogie microondes sur la reconstruction d'objets d'études en astrophysique liées aux grands télescopes ou radiotélescopes (ALMA, SPHERE,...) ; d'autres sont en construction comme l'utilisation de matériaux pour l'augmentation de l'efficacité de détection en imagerie TEP, ou le couplage entre instrumentation IRM et stimulation neuronale in situ.

**Soutiens RH prévus.** Certains axes sont d'ores et déjà renforcés par des soutiens RH permanents en 2022 : mobilité FSEP CNRS (AI BAPA) pour la biologie moléculaire et rapprochement d'un personnel APHM en ophtalmologie (PU-APHM, 2022) sur les développements en tomographie cohérente optique des pathologies de la cornée outil du plateau technique *Optique pour le Biomédical*. Outre les projets de renforcement des personnels EC/C, il reste à renforcer les personnels IT techniques dans les domaines où les soutiens de la recherche sont clairement en sous-effectif : caractérisations ultra-sensibles pour les optiques du spatial (qui va de pair avec l'implication de l'I. Fresnel dans les grands projets CNRS LISA et VIRGO, voir Section D2R4), fabrication et caractérisation de composants optiques, informatique. Ces soutiens sont en partie liés aux plateformes, afin d'accompagner les

défis à relever sur les instruments ouverts et leurs applications. Enfin le poste CDD AMU accueil en soutien ZRR est devenu CDI BAP G depuis 2022 et un concours interne Tech AMU en soutien gestion financière est prévu en 2022 afin de pérenniser le CDD BAPJ associé à ce poste depuis de nombreuses années.

**Impact économiques et sociétaux.** Parmi les projets menés au laboratoire, certains sujets touchent à des enjeux sociétaux comme la santé et l'énergie. Les projets reliés à la valorisation sont menés à différents niveaux. Ces aspects sont détaillés en Section D4 : dépôts de brevets, collaborations industrielles directes ou via des projets nationaux et Européens, projets de pré-maturation/maturation SATT ou CNRS, ou au travers des trois laboratoires communs. L'I. Fresnel entretient quelques collaborations approfondies avec certains industriels ou grandes organisations qui ont mené à une chaire industrielle (Multiwave, 2021) et une chaire CEA/ECM (2021). L'unité a contribué à des transferts industriels et à la création d'une start-up (LightCore technologies, <https://lightcore.tech/> 2019). Enfin l'unité accueille trois personnels financés dans le cadre du plan de relance.

### Référence 3. Le fonctionnement de l'unité est conforme aux réglementations en matière de gestion des ressources humaines, de sécurité, d'environnement et de protection du patrimoine scientifique.

**Principes de gestion des ressources humaines respectueux de la parité et non discriminatoire en matière de formation, de mobilité interne et d'évolution des carrières de ses personnels.** La gestion des ressources humaines repose sur des principes de parité et de non-discrimination imposés, au-delà de l'unité, par nos tutelles. Les recrutements de personnels CDDs, nombreux au laboratoire, sont opérés par les responsables scientifiques de projets et responsables de services (pour les services communs) en lien avec le service RH de l'unité : leur cadre est posé par les tutelles, par la charte HRS4R notamment (CNRS). Les risques de biais implicites lors des recrutements sont discutés systématiquement en amont de comités de sélection pour les ECs à AMU, procédure qui mériterait de s'étendre à tout recrutement au sein de l'unité.

Tout recrutement ITA, personnel permanent compris, impose la réalisation d'une fiche de poste réactualisée éventuellement au moment des entretiens annuels. Ceux-ci sont réalisés pour tous les personnels ITA (toutes tutelles confondues, CDD inclus pour les services administratifs) par leur responsable hiérarchique direct et en présence d'un membre de la direction pour les ITA des services communs, s'ils/elles l'approuvent.

L'information et les échanges entre responsables, direction et les personnels est facilitée par des réunions régulières (qui se sont toutes poursuivies par visio lors de la crise sanitaire) : réunion de services communs avec la direction (tous les mois), réunions responsables d'équipes – direction (environ tous les 3 mois). Ces réunions permettent d'identifier les problèmes potentiels, notamment relevant des ressources humaines et de la gestion des espaces (et dernièrement de la gestion du contexte sanitaire). Récemment la crise sanitaire a amené la direction à réunir également les doctorants et postdoctorants, opération qui sera renouvelée car très instructive et permettant de penser directement les solutions aux problématiques rencontrées par ces personnels de nationalités variées. Enfin des réunions ITA ont lieu en amont de chaque CL (~tous les 3 mois), afin de faire remonter les avis et points de discussion nécessaires.

Les nouveaux entrants sont accueillis lors d'une « journée des nouveaux entrants » dédiée à l'information générale. Lors de cette journée sont présentées les spécificités des services (présentations données par des personnels de tous les services communs), ainsi que l'environnement du laboratoire. Devant la complexité des procédures de recrutement, le service RH du laboratoire a également mis en place un atelier RH (2021) d'une demi-journée afin d'aborder les aspects techniques à tous niveaux. Celui-ci a été perçu très positivement et sera renouvelé lors des années à venir. Les informations sont également données lors des Assemblées Générales annuelles, et à tout moment via les personnels référents : dépôts de projets ANR, relations internationales et valorisation (3 référents dédiés), formation (1 COFO), sécurité informatique (1 CSSI), infrastructure, hygiène et sécurité et risques psychosociaux (RPS : en cours de mise en place) (2 APs). Certains ont été créés par l'unité pour la science ouverte, le développement durable (2019), la médiation formation-recherche (2021), et les questions relevant de l'informatique (commission informatique, dont le rôle est la mise en place d'actions pour inventorier et utiliser de manière plus optimale les ressources informatiques et logicielles de l'unité et du site).

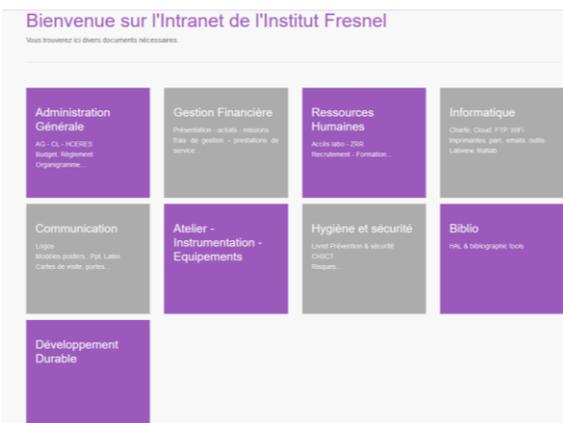
Par ailleurs, l'I. Fresnel organise des événements sociaux et d'échanges pour toute l'unité : « journée des doctorants » (2 jours, généralement en Juin) pendant lesquels des présentations scientifiques (doctorants et chercheurs) et non-scientifiques sont données, et des activités sportives/sociales sont organisées (130-150 personnes participent généralement). D'autres événements réguliers sont la galette (Janvier) et le pique nique (Juillet) du laboratoire, ainsi que le buffet de l'AG (Décembre).

Les personnels ont tous (CDD compris) accès à la formation, par des dispositifs de relai d'information et de collecte, mis en place par la correspondante formation (COFO). Les personnels ont suivi, au total sur la période de référence 133 formations (dont 101 suivies par des ITA). Ce sont en moyenne 22 formations par an, chiffre qui n'a pas fléchi pendant la période de la pandémie. En moyenne le taux de participation des chercheurs a augmenté, au plus bas en 2016 (8%), au plus haut en 2020 (36%). Les formations sont partagées entre

« spécifiques aux métiers » (programmation informatique, ...) et « générales » (management en temps de crise étant la formation la plus suivie récemment).

La gestion des carrières des personnels ITA/IATSS est suivie lors des entretiens annuels et par la progression possible des fiches de poste, ainsi qu'une incitation au passage des concours comme peut l'attester la réussite de certaines promotions (voir Section D1R1). Pour favoriser l'environnement de travail des ITA/IATSS dans les services les plus tendus en activité, l'unité recrute régulièrement des CDDs (service informatique, service RH). La carrière des EC/C révèle que les promotions EC sont difficiles à obtenir (voir Section D1R1), cependant la direction incite au passage HDR par les ECs (2 en cours de préparation) et l'encadrement de doctorants (soutiens lors des concours ED). L'unité promeut enfin l'implication des EC/C dans la formation des plus jeunes, en associant des étudiants dès les premières années d'étude (Licences, projets d'alternance ECM et Europhotonic) et au cours du master, mais également les scolaires (typiquement 4 à 8 stagiaires de 3<sup>ème</sup> / an). L'objectif de la mission spécifique créée récemment (2021) autour de la médiation formation-recherche (1 personnel EC dédié) est de structurer davantage l'accueil des étudiants et scolaires (visites annuelles, parcours proposés aux stages de 3<sup>ème</sup>, ...) et de relier cette démarche aux manifestations grand public par une présentation adaptée de l'unité. Pour ce qui est des actions relatives à la parité dans les métiers scientifiques, l'unité a participé à quelques actions en faveur de la promotion scientifique et des carrières (3 personnes impliquées dans le tutorat SFP de jeunes scientifiques, interventions dans des événements tels que Sciences XXL (CNRS), Portraits de femmes influentes Carnot, ANF 'carrière des physiciennes' organisée par l'INP...).

**Prise en compte des conditions de travail de ses personnels, à leur santé, à leur sécurité et à la prévention des risques psycho-sociaux.** Les conditions de travail des personnels sont encadrées par le règlement intérieur dans lequel sont consignées les informations relatives aux structures, aux droits et devoirs relatifs aux horaires et congés.



Les informations concernant la vie quotidienne administrative et organisationnelle de l'unité, sont disponibles dans l'intranet (Figure 12) régulièrement mis à jour (des personnels sont dédiés à cette tâche, organisation encore en cours d'amélioration).

**Figure 12: Intranet de l'Institut Fresnel.** L'intranet offre également la possibilité de réserver directement en ligne une salle de réunion et un bureau pour un personnel non-permanent, réservation validée par le personnel en charge du suivi des approbations ZRR (voir Section D1R3).

Chaque nouvel entrant suit la journée des nouveaux entrants destinée au relai d'informations sur les services et l'intranet, reçoit le livret d'accueil dans lequel se trouvent les informations relatives à l'environnement, au logement, au social. Ce livret est régulièrement actualisé par les services RH et communication, et est disponible sur l'intranet du laboratoire. Les nouveaux entrants signent également la charte informatique de l'unité.

Les personnels non-permanents sont localisés dans des bureaux partagés depuis 2018, suite à une réflexion menée par la direction avec les responsables d'équipes, les doctorants et CDDs/postdoctorants. Un sondage récent (2020) montre que ce partage est vu comme un point positif par les personnels concernés.

**Des dispositifs de veille** sont en place pour évaluer les possibles améliorations : sondages réguliers des personnels (en particulier doctorants/postdoctorants), implication des APs sur les aspects hygiène et sécurité et Risques Psychosociaux (RPS) (voir plus bas), réunions responsables d'équipes régulières (notamment sur les problèmes liés aux locaux), comités de thèse pour les doctorants (voir Section D2R2). Enfin depuis 2017, la direction rencontre environ tous les deux ans chaque équipe, lors de demi-journées dédiées à des échanges sur la recherche et le fonctionnement. Les situations d'isolement vécues lors de la crise sanitaire ainsi que les cas de détresse psychologique ont été notamment rapidement signalés et traités en collaboration avec la direction, et en cas de nécessité avec les services appropriés des tutelles.

Le groupe de travail hygiène, sécurité et conditions de travail, créé en 2010, se réunit une fois par an et est constitué de la direction, les 2 APs, les référents sécurité laser chimie/biologie et radioprotection. L'unité a également des sauveteurs secouristes du travail (SST), des chargés d'évacuation et du personnel formé à la manipulation d'extincteurs. Les actions majeures sur la période sont : mise en place d'un Groupe de Travail pour l'évaluation des Risques Psychosociaux (RPS), constitué de huit personnes représentatives des différentes catégories de personnel (un questionnaire mis au point par AMU est en cours de mise en place pour envoi à tous les personnels) ; mise en place de la plateforme d'e-learning NEO pour tous les personnels et nouveaux entrants; sensibilisation à l'utilisation du défibrillateur. En plus des informations délivrées par email et sur l'intranet, les présentations données à la journée des nouveaux entrants contiennent une partie consacrée à l'hygiène et à la sécurité, et des formations sensibilisation aux risques chimiques et laser sont données aux nouveaux entrants

concernés, ainsi que des exercices d'évacuation incendie. Les APs participent à la politique de demandes de moyens de l'unité en matière d'Hygiène et Sécurité, et font partie du CRHSCT de la DR12 du CNRS, en relation régulière avec les services de prévention d'AMU et du CNRS. Des visites ont lieu régulièrement à l'I. Fresnel : Service Prévention et Sécurité et médecine du travail du CNRS (oct. et nov. 2017) ; Ingénieurs de Prévention d'AMU (fév. et oct. 2020) ; et enfin visite de deux inspectrices de l'Inspection Générale de l'Administration de l'Education Nationale et de la Recherche (IGAENR) (2021), dont le retour a été globalement très positif. Chaque année, un exemplaire mis à jour et signé par la Directrice d'Unité du Document Unique d'Evaluation des Risques Professionnels (DUERP) est envoyé à chacune des tutelles.

**Dispositions mises en place pour la protection du patrimoine scientifique et des systèmes informatiques.** L'I. Fresnel est Zone à Régime Restrictif (ZRR) depuis 2015, ce qui implique une protection élevée du patrimoine scientifique, y compris par les personnes travaillant à distance. Le processus comprend un personnel (CDI depuis 2021) dédié à l'accueil pour le suivi des entrées et le recensement des entrées non répertoriées ZRR, un personnel dédié pour l'envoi des demandes d'approbation au fonctionnaire sécurité défense (FSD), la participation aux réunions d'information par le FSD, des points d'informations réguliers aux personnels et lors de la journée nouveaux entrants et ateliers RH. Un fichier de recensement dédié permet un suivi temps réel des demandes ZRR. Ce processus s'est progressivement stabilisé mais est vécu comme un véritable frein au recrutement par les responsables scientifiques, impliquant des délais importants y compris pour les stagiaires M2, des risques de non-recrutement, des situations de timing très tendus. Sur la période, les demandes ZRR ont été en moyenne de 72 demandes par an (avec typiquement 2 refus par an).

L'unité applique la Politique de sécurité des systèmes d'information (PSSI) du CNRS. Le Correspondant(e) sécurité du système d'information (CSSI, également responsable du service Informatique) gère les aspects liés à la sécurité des systèmes et des données, et fait le lien entre les instances de sécurité (RSSI, FSD), les liens SSI dans les tutelles, et l'unité. L'unité est placée en aval d'un pare-feu applicatif permettant de filtrer un certain nombre d'applications interdites ou déconseillées. Tout personnel recruté signe à son arrivée la charte informatique, qui contient les devoirs et droits en matière d'utilisation des réseaux et matériels informatiques de l'unité. L'unité tient un inventaire de toutes les nouvelles machines, et utilise un outil de gestion de parc OCS (Open Computer and Software) Inventory pour le suivi des versions de logiciels open source utilisés au sein de l'unité.

**Démarches mises en place sur le développement durable** depuis 2019. Un groupe de travail dans ce domaine a été créé (3 personnels) qui intervient dans les assemblées générales et réalise des actions importantes, impliquant parfois des modifications des infrastructures : (1) concernant les déchets, Aix-Marseille Université a mis en place des marchés pour la collecte du papier, des cartouches d'imprimantes et le mobilier de bureau, mais ces marchés n'étaient que partiellement connus des agents. L'accent a donc été mis sur l'information, et une nouvelle rubrique dédiée a été créée sur l'intranet du laboratoire. Ces collectes sont désormais bien établies et ont permis de réduire sensiblement les volumes de déchets. Le laboratoire a également mis en place la collecte des cartons d'emballages, les volumes étant très importants sans qu'aucune solution ne soit proposée par l'université. Entre 50 et 100kg de cartons sont donc collectés chaque mois sur le site du laboratoire puis recyclés par une société privée ; (2) le laboratoire a calculé depuis 2018 ses émissions de gaz à effet de serre. Les postes d'émissions considérés sont les consommations énergétiques des bâtiments, les déplacements liés aux missions et aux déplacements domicile-travail, ainsi que les achats de matériel informatique. Nous utilisons désormais l'outil GES1.5 développé et mis à disposition par le GDR Labos1.5 ; (3) cette évaluation de l'impact carbone du laboratoire permet d'éclairer les agents sur l'impact de leur activité professionnelle, et permet à la direction de mettre en place certaines actions incitatives en vue de la réduction des émissions. Afin d'encourager la pratique du vélo dans le cadre des déplacements domicile-travail, deux abris sécurisés ont été installés et financés par l'unité qui a bénéficié du co-financement du programme Alvéole. Du matériel d'entretien et de réparation est également mis à disposition des agents utilisant ce moyen de transport ; (4) enfin trois ECs ont créé en 2021 un UE "Sciences physiques et climat" destinée aux étudiants de première et deuxième année de licence à Aix-Marseille Université.

**L'unité a mis en place un plan de continuité d'activité (PCA)** dès les premiers jours de crise sanitaire (mars 2020), à l'initiative de ses tutelles AMU et CNRS. Ce plan est désormais pérenne dans l'unité et suit les modalités fixées par les tutelles (voir Annexe 2) : il nomme les personnes contacts clés en cas de crise et les personnes indispensables au fonctionnement technique, afin d'assurer leur accès au site à tout moment (suivi et maintenance quotidienne de certaines machines). Il assure la mise en place et le suivi de jauges de nombre de personnels si nécessaire en privilégiant les activités de présence, assure un suivi sanitaire au sein du laboratoire (plan de circulation, affichage d'un nombre de personnes par pièce etc), assure la répartition des locaux si nécessaire (bureaux isolés/partagés). Les personnels des services communs (responsable administrative, accueil, communication) sont partie prenante de la mise en place de ce plan. La période de crise sanitaire a été révélatrice d'un fonctionnement globalement réactif, transparent et soudé. Entre mars 2020 et octobre 2021, les informations et instructions immédiates et régulières étaient communiquées par mail ou réunions visio, d'une part auprès des responsables d'équipes pour sonder et conseiller sur la gestion des aspects matériels, humains et d'encadrement, d'autre part auprès des services communs (une visio par semaine pendant le confinement de 2020). Des bilans étaient périodiquement effectués, y compris avec le conseil de laboratoire régulièrement réuni. Le fonctionnement avait pour but d'assurer le travail de tous à distance,

réajustant parfois de manière drastique les fonctions, notamment pour les doctorants et CDDs, en assurant la présence du matériel informatique nécessaire. La préparation de la visite du comité externe, initialement prévue en mai 2020, a notamment permis de maintenir un lien scientifique entre les membres des thèmes et entre les thèmes. A la sortie du confinement (mi-mai 2020), un PCA régulièrement ajusté aux instructions des tutelles a permis une gestion suivie du retour des effectifs (partage du temps et des bureaux) et des activités. La gestion du bâtiment et du matériel de protection a été, au départ, entièrement assurée par l'unité (distribution suivie de masques et de gel hydro alcoolique, installation de dispositifs adaptés dans les sanitaires), grâce à l'organisation des personnels et des services communs et des APs. Notons qu'en parallèle, dès mars 2020, l'unité a organisé du don de matériel (masques, gants) et a hébergé une plateforme d'imprimantes 3D pour la fabrication de visières pour les personnels de l'hôpital (plus de 4000 visières ont été fournies). A la sortie de la période, la direction a organisé des réunions visio avec d'une part tous les doctorants, d'autre part tous les CDDs/Postdocs, pour sonder les priorités RH des personnels non-permanents (choix des événements communs, relai d'information sur le soutien psychologique, ...).

## Synthèse de l'autoévaluation

L'unité voit ses effectifs et ressources propres augmenter, signe d'une attractivité importante et du dynamisme des recherches effectuées par ses personnels. Des structures sont mises en place de manière collective pour rendre effective la réflexion et les décisions sur les aspects scientifiques, stratégiques et d'organisation. La structure de l'I. Fresnel en thèmes scientifiques a montré son efficacité et l'apport en terme de visibilité, tout en préservant un fonctionnement opérationnel dans les équipes. Certains aspects sont néanmoins critiques : le ratio ITA-chercheurs insuffisant pour la continuité des savoir-faire et le suivi des projets, la gestion de locaux non adaptés en taille à l'accueil de nouveaux projets d'envergure, le frein sur les délais de recrutements imposé par le statut ZRR.

## Domaine d'évaluation 2 : Attractivité

### Référence 1. L'unité est attractive par son rayonnement scientifique et contribue à la construction de l'espace européen de la recherche.

**Conférences.** Au total sur la période, 240 conférences invitées ont été données par les personnels de l'I. Fresnel, dont 215 dans des conférences internationales, avec un taux élevé dans le thème Modélisation Electromagnétique (environ 4 par permanent). Le rayonnement international de l'institut Fresnel s'est également traduit par la participation des C/EC dans les comités d'organisation de diverses conférences ou événements organisés par les sociétés savantes (Optica, SPIE, SFP...). Parmi ceux-ci on peut citer une participation active à la conférence Metamaterials depuis de nombreuses années dont l'édition 2017 s'est déroulée à Marseille et à réunit 377 participants de 36 nationalités différentes pendant 6 jours. Les C/EC sont également dans un grand nombre de comités d'organisation de conférences sur la nanophotonique et les composants optiques (CLEO Europe, NANOP, EOSAM, METANAO, OIC...), les télécommunications (CSNDSP Conference, IEEE 5G World Forum...) et l'imagerie (SPIE Photonics Europe, Photonics West, MIFOBIO...).

**Workshops.** Les chercheurs de l'I. Fresnel ont organisé une vingtaine de workshops de site ou nationaux, et une dizaine de workshops internationaux au cours de la période, couvrant l'ensemble des quatre thèmes. Parmi les workshops internationaux, le workshop Nanoscale Quantum Optics (NQO) (2016, ~60 participants) sur les thématiques liées à l'optique quantique, suivi d'une école thématique soutenue par le CNRS sur la seconde révolution quantique (2021, <https://qrevolutions21.sciencesconf.org>); le 6ème workshop européen sur le traitement de l'information visuelle (EUVIP 2016, ~ 50 participants) sur le traitement de l'information visuelle ; la 4ème Summer School on Plasmonics (SSOP4 2017, ~100 participants). Deux workshops en couches minces ont également été organisés en 2016 (SFO) et 2019 (Renatech) (~40 participants). Le premier était orienté sur le lien académiques/industriels tandis que le deuxième regroupait majoritairement des ITA des plateformes de Renatech. Deux workshops ont été organisés en 2017 sur les aspects biophotoniques : Biomedical Optics (~50 participants) sur l'imagerie biomédicale utilisant des techniques optiques et « Multiphoton Excitation Microscopy to Optical Nanoscopy, Biophotonics and their applications » organisé conjointement avec la société Coherent (~80 participants) sur le domaine de l'imagerie Multiphotonique du Vivant. En 2018, le workshop Interaction Rayonnement/Matière : du solide au plasma organisé à Marseille (~50 participants). Les chercheurs ont également participé à l'organisation au Workshop du GDR onde (Advanced theoretical and numerical methods for waves in structured media) qui a regroupé environ 80 chercheurs sur les aspects modélisation de la propagation des ondes dans de nouvelles structures.

Enfin, au-delà des workshops organisés dans le cadre des Laboratoires Internationaux ALPhFA et IMAGINano (4 workshops), les chercheurs de l'unité ont organisé des workshops plus ciblés entre l'institut Fresnel et d'autres instituts au niveau international, visant à partager les domaines d'intérêt actuels et mettre en place des

collaborations privilégiées (~ 20 participants). C'est notamment le cas en février 2020 (3 jours), avec des chercheurs d'ITMO sur la photonique, les métamatériaux et l'imagerie IRM, et en septembre 2021 (2 jours) avec Imperial College London (ICL, avec qui l'I. Fresnel collabore depuis plus de 15 ans) et le Centre for Plasmonics and Metamaterials sur des aspects fondamentaux et appliqués des métamatériaux, de la plasmonique et de la nanophotonique. Ce workshop a donné suite à des échanges entre ICL et AMU pour l'établissement de programmes communs de recherche et de soutiens doctoraux.

**Les personnels de l'I. Fresnel sont particulièrement impliqués dans des responsabilités éditoriales.** Nous comptons dans l'unité l'éditeur en chef d'Optics Letters (M. Alonso), un éditeur en chef adjoint d'Optics Express (deputy editor) également rédacteur en chef de la revue Photoniques (N. Bonod), et trois éditeurs associés (associate editor) (Optica et Optics Express, IEEE Electronics Transactions in Communications, European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging et Neuroradiology). Neuf personnels sont impliqués par ailleurs dans les comités éditoriaux (Sc. Reports, Proc. Royal Soc. London A, European Physics Journal Applied Metamaterials, Journal Advances in Mathematical Physics, Journal of Biomedical Engineering and Informatics ...) ou ont dirigé des séries spéciales en tant que guest editors.

**Participation aux instances de pilotage de la recherche ou d'expertise scientifique.** Actuellement, des personnels de l'unité occupent les postes de vice-présidence déléguée Science et Technologie AMU (S. Enoch, depuis 2020), direction de l'Ecole Centrale Marseille (ECM) (C. Deumié, depuis 2019), de direction de la recherche à ECM (M. Alonso, depuis 2020), la direction de l'institut CARNOT STAR (S. Monneret, depuis 2017), et un chercheur a occupé la présidence de la section 08 du Comité National de la Recherche Scientifique au CNRS (C. Amra, 2016-2021). 22 personnes sont actuellement présentes dans les conseils scientifiques et d'administration de ECM, AMU/UFR Sciences, à la SATT, OPTITEC et au CNRS. Les membres de l'institut Fresnel sont également présents dans les grandes organisations avec la responsabilité de l'équipe LISA pour le CNRS et l'ESA (M. Zerrad). Les tâches d'expertises essentielles impliquant les personnels de l'unité (hors expertises ANR ou régionales qui sont très nombreuses) sont des rôles de membres de panels d'experts de projets EU (panels ERC AdG, CoG, expertises pour H2020 (au moins 3 personnes)), la présence de membres de comités et présidence de comités HCERES (au moins 9 sur la période), pour l'IUF (3 personnes) ou dans le comité attribution temps de faisceaux synchrotrons France/USA/Suède (V. Chamard).

**Distinctions.** Sur la période, des prix et distinctions importants ont été obtenus : au niveau national (S. Brasselet Médaille Argent CNRS 2016, E. Popov IUF membre sénior 2016-2021, R. Abdeddaim 3ème Prix FIEEC Carnot de la recherche appliquée 2019), par les sociétés savantes (J. Wenger Prix d'instrumentation en chimie physique SFP/SFC 2017), mais également à l'échelle européenne (S. Enoch, R. Abdeddaim Trophée Etoile de l'Europe 2021, S. Enoch membre de l'Académie Européenne des Sciences 2019) ou du site (S. Enoch Prix de l'innovation AMU 2019). Enfin nous comptons sur la période 4 nominations OSA (OPTICA) Fellow (2020, 2021). Chez les plus jeunes, 10 prix de thèse ont été obtenus (de l'école doctorale Physique et Science de la matière, de l'innovation, C'Nano, et 2 prix de thèse AMU) et de nombreux (>10) prix de présentations dans des conférences internationales, mais également des prix prestigieux : For Women In Science Young Talent Award, UNESCO - Fondation L'Oréal (2020), Paul Callaghan Young Investigator Award (2019), Young Investigator Award, MMS (2017), Young Scientist Award, IEEE Radio Antenna Days (2018).

**Visibilité de l'unité.** Nous avons reçu à l'I. Fresnel quelques visites importantes qui méritent d'être signalées : visite de Jean-Luc Moullet, directeur général délégué à l'innovation du CNRS (11 mars 2020), accompagné de la Déléguée Régionale CNRS Provence et Corse (DR12) ; visite du président-directeur général du CNRS Antoine Petit (9 février 2021), et visite de Frédérique Vidal, Ministre de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation (31 mai 2018) dans le cadre d'un déplacement officiel dans la cité phocéenne. Pendant cette visite, les différentes thématiques et équipements de pointe ont été présentés en présence du Président d'Aix-Marseille Université, de la Déléguée Régionale DR12 CNRS et du Directeur de l'École Centrale Marseille. Enfin dans un cadre international, Mr. Jean-Eric Paquet, Directeur Général de la recherche et de l'innovation de la Commission Européenne, est venu visiter le projet FET-Open MCUBE dans les locaux CERIMED (2018), ainsi que Pr. W.E. Moerner, prix Nobel 2014 de Chimie, dans le cadre de la réception de son prix Dr Honoris Causa AMU (novembre 2016).



Visites de F. Vidal (2018) et A. Petit (2021)

**Contribution de l'unité dans les réseaux nationaux.** L'I. Fresnel fait partie des réseaux d'infrastructures FranceBioImaging et FranceLifeImaging, ainsi que d'au moins six Groupes de Recherche (GDRs), parmi lesquelles certains dans lesquels les personnels sont très impliqués : IMABIO, APPAMAT, ONDES, META (direction adjointe du GDR IMABIO et du GDR APPAMAT en charge des relations aux industriels, responsabilité de 3 groupes de travail au GDR Ondes (« modélisation et simulation », « ondes en milieux complexes », et CDIS – Comparaison de Données entachées d'Incertitudes), membre du bureau du GDR META). Les personnels sont également impliqués dans la construction des stratégies nationales de la recherche via les projets Programme d'Investissements d'Avenir (PIA3) dont l'I. Fresnel est coordinateur (IDEC) ou partenaire (NEUROCIRCUITS, NanoFutur et 4D-OMICS) (voir Section D2R3), ou encore au travers des PEPR (Programmes et équipements prioritaires de recherche exploratoires), dont certains personnels sont contacts dans l'unité (l'unité n'étant cependant pas partenaire direct de ces programmes) : PEPR Electronique « accélération au sein de la stratégie électronique » (86 M€) ; PEPR « Stratégie d'accélération sur la 5G et les réseaux du futur » (65M€) ; et un projet en cours de re-soumission PEPR I2S2 « Instruments de demain, innovative instruments for science and society ».

**Responsabilités dans les sociétés savantes.** Les personnels de l'I. Fresnel sont investis par quelques missions dans les sociétés savantes : un membre du Conseil d'Administration Société Française d'Optique SFO (élu, 2019-2023), le président du club couches minces optiques SFO (2019-2021), membre du groupe technique couches minces optiques de l'OSA (2019-2021), membre élue du Conseil d'Administration de l'EOS (2021-2025), Responsable du groupe de travail Neuro de la SFMN (Société Française de Médecine Nucléaire) (2019-2022).

**Création de réseaux internationaux et participations à ces réseaux.** Des partenariats scientifiques étroits avec certains centres internationaux ont été liés à travers deux laboratoires internationaux associés (LIA). Le premier, ALPhFA (Associated Laboratory for Photonics between France and Australia), renouvelé en 2018, est un partenariat entre l'Institut Fresnel, le C2N, FEMTO-ST et l'INL pour la France et cinq universités australiennes. Il porte sur la plasmonique, les métamatériaux et la photonique dans le moyen infrarouge. Le second, IMAGINano (2016-2021) est un partenariat CNRS avec le Weizmann Institute, Tel-Aviv University, et Hebrew University of Jerusalem en Israël et porte sur les innovations en microscopie et imagerie biologique, les processus biologiques photo-induits, les biocapteurs et biopuces et la nano-physique. Ces deux laboratoires ont contribué à 17 publications à l'I. Fresnel sur la période de référence. Les partenaires du Master Europhotonics POESII sont aussi des partenaires privilégiés dans les collaborations scientifiques (par exemple ICFO à Barcelone). L'Institut Fresnel est coordinateur de l'IRN PHOTONET (<https://cnrsbeijing.cnrs.fr/project/photonet/>) (2019-2023), outil structurant de coopération de recherche franco-chinoise dans les domaines de la photonique, de l'optoélectronique et de la biophotonique. Ce réseau (~60 personnes) s'appuie sur les collaborations bilatérales de 15 laboratoires partenaires, dont 7 français et 8 chinois. Une collaboration débutée dans le cadre du projet H2020 FET-OPEN M-Cube, est également en place avec IMTO à Saint Pétersbourg. Cette collaboration implique plusieurs chercheurs de l'unité et a donné lieu à 13 articles de revue, 22 communications orales et un brevet commun. Une collaboration de recherche avec Rochester University (USA) existe également depuis la chaire d'Excellence impliquant un chercheur de cette université (2018-2022), avec des échanges d'étudiants (2 doctorants, 1 postdoctorant), des publications communes autour des problématiques de cohérence spatiale et de polarisation et des programmes de recherche sur les performances de systèmes optiques, notamment avec le Center for Freeform Optics. Enfin avec l'Inde, une collaboration avec le CSIR-CSIO à Chandigarh porte sur le contrôle du champ proche optique et radiofréquence dans le cadre d'une « International Emerging Actions ». Enfin une collaboration entre le CRMBM, l'I. Fresnel et le Centro de Biofísica Médica, Universidad de Oriente à Santiago de Cuba démarre sur les développements de l'imagerie et des technologies IRM. Enfin, l'I. Fresnel est partenaire des actions ACTPHAST 4.0 (ACceleraTing PHotonics innovATion for SMEs: a one STop-shop-incubator) et H2020-DT-ICT PhotonHub Europe (One-Stop-Shop Open Access to Photonics Innovation Support for a Digital Europe), réseaux de compétences en métrologie et technologies optiques pour une innovation collaborative entre PME et laboratoires académiques européens, quelques actions collaboratives de recherche étant soutenues à ce titre.

## Référence 2. L'unité est attractive par la qualité de sa politique d'accueil des personnels.

**Environnement et encadrement des doctorants et postdoctorants.** L'accueil des doctorants et postdoctorants est, pour les aspects organisationnels et humains, adressée en Section D1R3. Ils/Elles bénéficient notamment d'une introduction au fonctionnement de l'unité lors de la journée des nouveaux entrants, et du livret d'accueil dans lequel sont consignés les aspects essentiels à l'intégration. Les contacts administratifs sont ainsi bien identifiés dès leur arrivée. L'encadrement des doctorants est complété par la présence d'un comité de thèse nommé dès leur première année de thèse, composé de 3 membres hors de l'équipe de recherche de l'étudiant(e) et non directement concernés par son domaine scientifique, jouant le rôle de mentor tout au long de la thèse. Les comités de thèses sont proposés par la direction et restent inchangés tout au long de la thèse.

Ce comité de thèse, requis par le collège doctoral, approuve ou non l'inscription dans l'année suivante de la thèse et permet d'anticiper les possibles situations d'abandon de thèse. Le/la doctorant(e) rencontre son comité de thèse lors d'une session formelle pendant laquelle sont discutés les avancées scientifiques et les aspects divers (humains, matériels, organisationnels). Les étudiants des autres EDs (62 notamment en Sciences de la Vie) ont également un comité de thèse à l'I. Fresnel. Les doctorants sont formés par des modules scientifiques et non-scientifiques organisés par les écoles doctorales. Les EC/C de l'I. Fresnel organisent dans ce cadre deux modules de formation doctorale depuis 2011, « modélisation » et « nanobiophotonique », qui sont l'occasion pour les nouveaux arrivants de mieux connaître les équipes de recherche. Le partage de bureaux communs pour les personnels non-permanents permet aux plus jeunes de se rencontrer et interagir sur leurs travaux. Enfin les encadrants scientifiques sont sensibilisés à la présence des doctorants dans les publications, condition indispensable à l'autorisation de soutenance de thèse. Enfin il est à noter que l'unité a permis, sur fonds propres, le financement de quelques prolongations de thèse fortement impactées par la crise sanitaire en 2020-2021, qui ne pouvaient être financées par ailleurs.

Les doctorants et postdoctorants participent également aux journées du laboratoire « journées des doctorants » pendant lesquelles les doctorants donnent des présentations courtes sur leurs travaux scientifiques (à partir de 2022, les postdoctorants donneront également des présentations) et suivent quelques séminaires spécifiques (centrés sur les carrières, l'écriture de publications, les problématiques sociétales, ...). Ces journées sont aussi l'occasion de renforcer les liens sociaux entre tous les personnels et ouvrir à des séminaires autres que du domaine de l'I. Fresnel. Ils/Elles donnent aussi des séminaires lors des séminaires de thèmes dédiés aux présentations des jeunes. Les doctorants ont également leur propre session de séminaires réguliers dans lesquels les responsables scientifiques ne participent pas.

La direction de l'unité a enfin récemment fortement soutenu (administrativement et formellement) la création du **MEMO (Marseille Electromagnetism and Optics) student association (student chapter)**, en février 2020 par des doctorants d'AMU, et reconnu « OPTICA Student Chapter Marseille » par OPTICA en 2021. Ce groupe réunit plus de 20 doctorants et quelques postdoctorants, et a déjà organisé plus de 10 webinars sur des thèmes larges depuis l'optique quantique à la Green Tech, sur comment écrire une publication ou se lancer dans la création d'une start-up (plus de 1000 visites). Des entreprises ont été invitées à donner des séminaires au laboratoire et des événements sociaux sont organisés tous les mois pour souder la communauté, faciliter les échanges et partager des idées. Les projets à venir couvrent une conférence organisée le 1/7/2022 sur « Biosensing-Bioluminescence » (ECM, ~10 conférenciers invités internationaux) ; la réalisation d'un film pour expliquer les recherches au grand public ; un webinar sur les techniques de couches minces. Les quatre membres du board sont des doctorants de l'I. Fresnel.

L'unité est sensible au devenir des doctorants et postdoctorants. Leur parcours peut inclure des participations aux enseignements par des contrats de monitorat (pour les doctorants), l'encadrement de stagiaires ; les opportunités de postes ATER sur AMU et de postes dans d'autres unités et entreprises sont très régulièrement communiquées. Sur les doctorants sortants (66 de situation connue), 45% ont été recrutés dans le secteur privé, 24% sont postdoctorants, 12% ont obtenu un poste titulaire dans la fonction publique (C, EC, ITA), 13% sont titulaires ou contractuels dans la fonction publique hors laboratoire de recherche, et 6% sont en recherche d'emploi (doctorants récents).

**Recrutements de EC/C juniors et seniors.** L'unité est active dans la recherche de bons candidats pour soutenir des activités émergentes : environ 5 candidats candidatent sur des postes CR CNRS par an, des candidats à des chaires d'excellence (2 en 2016, 2018, et récemment 2 en 2021) et chaire industrielle (2021). Les recrutements récents (2 CR CNRS : en mathématiques appliquées à l'électromagnétisme (2018) et en Imagerie photo-acoustique pour la biologie (2019) ; 2 MCF AMU : en théorie du signal (2018) et en traitement des images (2020)), ainsi que le recrutement d'un PR ECM (2020, à la suite d'une chaire A\*Midex 2018) ont permis de générer de nouveaux axes théoriques et expérimentaux. Par ailleurs l'unité a accueilli 2 IRs dans le service commun informatique (par mobilité CNRS et recrutement AMU) pour le traitement des images et le calcul numérique, qui viennent en soutien aux équipes dans des domaines très larges. Le soutien de démarrage aux jeunes chercheurs est apporté par le biais d'un renforcement de la dotation des équipes concernées (2 k€) et le soutien prioritaire aux appels fonds de soutien (15 k€). Les succès des jeunes recrues aux appels dédiés ont été par ailleurs importants (Momentum CNRS 2018, AAP Région et AAP ville de Marseille 2019). L'accueil des EC/C juniors va de pair avec le déploiement d'espaces expérimentaux lorsque cela est nécessaire (1 ou ½ salle), et un bureau.

**Accueil de chercheurs invités.** L'I. Fresnel a accueilli 9 professeurs invités sur des séjours de 3 semaines à quelques mois (Univ Tampere Finlande, Univ Colorado USA, Honk Kong, Russie, Belgique, France). Les financements viennent de soutiens spécifiques professeur invité AMU, ECM et Master Europhotonics. Ce type de séjour a notamment récemment permis l'obtention de la chaire d'excellence A\*Midex stabilisée en poste PR ECM.

**Intégrité scientifique et science ouverte.** Les formations délivrées aux doctorants sur les problématiques d'intégrité scientifique sont coordonnées par le collège doctoral de AMU, qui permet une sensibilisation et une prévention sur ces questions. L'encadrement des doctorants par les comités de thèses sont les garants supplémentaires d'une conscience des jeunes chercheurs sur ces problématiques. Les aspects pratiques tels que les cahiers de laboratoire (gestion SPV CNRS) assurent une partie de la traçabilité et de la reproductibilité

des résultats des étudiants. Ces aspects ainsi que la sensibilisation à la science ouverte sont décrits en Section D3R3.

### Référence 3. L'unité est attractive par la reconnaissance que lui confèrent ses succès à des appels à projets compétitifs.

**Appels à projets compétitifs.** Pendant la période, les personnels de l'unité ont acquis un nombre important de projets nationaux : 24 projets ANR (5.1 M€), également appels d'offre FUI, MITI CNRS, Canceropole ou fondations type médicales (3 projets sur la période). Les personnels de l'unité participent également aux appels d'offres de la région et du site via la fondation A\*Midex : 11 projets A\*Midex ont été financés ainsi que 9 projets Région/Collectivités (1.2 M€). Le reste des contrats concerne les PIA (voir plus bas), et les contrats de collaborations industrielles / LabCom (23), parmi lesquels 3 plans de relance France « Préservation de l'emploi R&D » (401 k€) (voir Section D4), 101 projets industriels et prestations de services, 16 projets Carnot et SATT (2.3 M€).

Au niveau international, l'unité a acquis 20 projets Européens dont 3 projets ERC (2016, 2017) (4.9 M€) (Tryptoboost, 3DBiomas, HiPhore), 4 ITN (2 M€) (2018, 1 2017 en tant que porteur, VisioN: European Training Network on Visible light based Interoperability and Networking) (MUSIQ, INSPIRE, GREAT, VISION), 3 ICT (Information and Communication Technologies - Research and Innovation Actions RIA) (CRIMSON, M-CUBE, M-ONE) (1.7M€), et 13 autres projets EU dont un EUROSTAR EUREKA et un COST en tant que porteur (2020 NEWFOCUS : European network on future generation optical wireless communication technologies). L'I. Fresnel est également partenaire des actions ACTPHAST 4.0 (ACceleraTing PHotonics innovATion for SMEs: a one Stop-shop-incubator) et H2020-DT-ICT PhotonHub Europe (One-Stop-Shop Open Access to Photonics Innovation Support for a Digital Europe). L'unité a par ailleurs bénéficié d'opportunités A\*Midex dans ce contexte avec la co-direction de six bourses de thèse « DOC2AMU » CoFUND.

Le taux de succès aux projets type ANR est à la hauteur de la moyenne nationale, il est à noter cependant que les soumissions aux projets EU ont été nombreuses (à titre d'exemple en gestion CNRS, 46 ANRs et 23 projets EU (11 ERCs, 3 ITNs, 3 EIC, 3 FETOPEN) ont été déposés, ainsi que 23 autres AAP nationaux). Par ailleurs en 2022 deux ERCs ont été acceptés (1 ERC StG et 1 ERC AdG, thème Imagerie), et l'I. Fresnel participe à une ERC AgG en tant que partenaire (Dust2Planets, thèmes Imagerie et Modélisation Electromagnétique).

La répartition des ressources propres sur les thèmes montre des chiffres plus importants pour les thèmes les plus appliqués : Nanophotonique et Composants et Imagerie, suivi de Information et Photonique, qui comporte une partie d'activités fondamentales, et enfin Modélisation Electromagnétique, à caractère principalement fondamental. Cette répartition n'est pas surprenante compte tenu du type d'activités concernées et de la difficulté des succès aux appels d'offre sur projet de recherche fondamentale. Les ressources internes au laboratoire (fonds de soutien et collectifs) permettent de pallier partiellement ce problème, qui nécessite cependant pour les équipes d'orienter leurs types de projets vers de l'applicatif. Les grands projets Européens sont majoritairement issus des thèmes Nanophotonique et Composants et Imagerie, très probablement en raison de leur nature interdisciplinaire autour de la photonique et ses applications. Les projets valorisation touchent majoritairement les thèmes Nanophotonique et Composants, Imagerie et à moindre essor Information et Photonique, pour des raisons de thématiques et des applications associées.

**Incitation aux appels à projets.** La communication sur les appels à projets sur le site Marseillais (instituts, A\*Midex), nationaux (ANR, CNRS...) et internationaux (EU) a considérablement augmenté par une coordination de ces aspects par les tutelles. Ces informations sont systématiquement relayées et la présence d'une référente ANR depuis 2020 rend la gestion des appels plus visible par l'unité. L'existence de structures dédiées pour l'aide au montage et à la rédaction de projets dans les appels compétitifs (coaching du Cercle, club des ERCs du site d'Aix Marseille, ou mardis de la deleg, réunions d'informations par le SPV DR12 CNRS) sont des outils qui semblent montrer progressivement leur efficacité, l'unité a vu le nombre de soumissions et projets financés augmenter depuis le quadriennal précédent. Les efforts dans ce sens se poursuivent, comme par exemple la visite récente (février 2022) du service SPV CNRS au laboratoire pour rencontrer les chercheurs et personnels administratifs.

**Participation aux programmes d'investissements d'avenir (PIA).** Parmi les projets d'infrastructure nationale, l'I. Fresnel est partenaire du projet FranceBioImaging qui réunit 7 nœuds régionaux autour de l'imagerie pour la biologie (financement IF 200 k€ sur la période). L'I. Fresnel est coordinateur du projet Programme d'Investissements d'Avenir PIA3 Equipex+ IDEC (2021-2026) « Imagerie et Détection Computationnelles » (2.3 M€ IF, ouvert vers les communautés biologie/biomédical, spatial et astrophysique) (voir Section D2R4). Ce projet vient augmenter le nombre d'instruments ouverts dans les plateformes de l'unité, en y ajoutant des instruments couplant approches numériques et approches d'imagerie, de caractérisation d'optiques de haute sensibilité par diffusométrie, et d'imagerie microonde par analogie pour la reconstruction d'information sur des objets du spatial. L'I. Fresnel participe depuis 2021 à d'autres projets PIA3 Equipex+ : de manière directe à l'Equipex+ NEUROCIRCUITS (300 k€ IF, porteur INMED), portant sur l'instrumentation pour l'imagerie neuronale dans le petit

animal et 4D-OMICS porté par l'Université Côte d'Azur, qui vise à construire en région Sud un instrument numérique de biologie quantitative multi-échelle. L'I. Fresnel est également impliqué indirectement dans l'Equipex+ NanoFutur (Investissements en NANOfabrication pour les nanotechnologies du FUTUR) porté par la communauté académique française des nanotechnologies et le réseau RENATECH+ (5 centrales RENATECH et 27 centrales régionales récemment associées).

**CPER.** L'I. Fresnel est coordinateur pôle Marseillais du Contrat de Plan Etat Région (CPER) (2021) PERTINENCE (DévelopPEment des centRales de Technologie de la régiON Sud ProvENCE Alpes Côte d'Azur) ordonné par CNRS-UCA (Sophia-Antipolis) et Aix Marseille université (4.6 M€ dont 1 M€ IF). Ce projet autour des centrales micro-nanofabrication (outils lourds de pointes dépôt, gravure, caractérisation) regroupe 4 laboratoires de la région Sud (Institut Fresnel, CRHEA, IMN2P et CINaM) répond à la problématique de la jouvence des équipements et au besoin d'acquérir de nouvelles technologies rares et très coûteuses. L'équipement I. Fresnel concerne une machine de dépôt de couches minces optiques par pulvérisation cathodique magnétron. L'I. Fresnel bénéficiera également directement d'un CPER coordonné par l'APHM pour l'acquisition d'une caméra TEP grand champ sur la plateforme CERIMED, l'une des premières installations de ce type en Europe.

**Financements de soutiens RH et équipements lourds.** Parmi les projets financés dans l'unité, un grand nombre est associé à des soutiens RH (systématique dans les ANR ou projets EU). Les soutiens RH postdoctoraux et ingénieurs/techniciens sont essentiellement financés sur contrats, et en partie par des appels d'offres ou soutiens dédiés aux plateformes. L'activité grandissante en valorisation augmente la collaboration avec les structures de valorisation du site (Service Partenariat Valorisation CNRS, institut CARNOT, A\*Midex) par des soutiens CDDs (voir Section D4). Sur l'ensemble des doctorants de l'unité, une faible portion (9-12%) bénéficie de bourses de l'école doctorale, 10% de bourses CIFRE, le reste est uniquement financé sur contrat de recherche (essentiellement ANR, EU) ou accompagnements des LabComs et chaires (A\*Midex, CEA/ECM). Les équipements lourds hors ERC sont principalement financés sur les recettes des plateformes, les projets co-financés (AAP Région, AAP ville de Marseille : 550 k€ sur la période, pour le financement de machines couches minces et équipements pour l'imagerie photoacoustique), les projets grandes infrastructures FranceBioImaging et PIA IDEC (voir plus haut) contribuent au financement de sources lasers pulsées pour l'imagerie non-linéaire dans les tissus, à des équipements innovants pour l'imagerie, de diffusion en environnement propre, et d'imagerie par analogie microondes.

#### Référence 4. L'unité est attractive par la qualité de ses équipements lourds et de ses compétences technologiques.

L'unité possède un espace et des infrastructures dédiés à des activités plateformes qui couvrent un large panel d'applications allant de la prestation industrielle aux projets de recherche collaboratifs. Deux plateformes labellisées (*Photonique*, *Diffusif*) et deux plateaux techniques (*optique pour le biomédical*, *chambre anéchoïque*) (voir plus bas) couvrent des thématiques directement reliées aux savoir faire des chercheurs, allant de la fabrication de composants au développement d'outils de caractérisation et d'imagerie en optique et microondes. Les plateaux techniques permettent d'exercer des activités de collaboration dans un contexte qui peut éventuellement mener à des plateformes. Les thèmes reliés à ces outils sont Nanophotonique et Composants, Imagerie, et Information et Photonique. Les deux plateaux techniques sont opérés par des membres des thèmes Imagerie.

Ces plateformes, qui illustrent la place de l'I. Fresnel comme l'un des lieux de référence dans le domaine de l'optique, apportent aujourd'hui une plus-value pour les chercheurs et des dynamiques nouvelles de collaborations variées. Certains projets émergents sont en particulier directement issus de premiers contacts pris dans le cadre d'activités plateformes : activités autour du spatial, de couches minces appliquées aux métamatériaux et à l'imagerie. Enfin, certaines activités mènent à des dépôts de déclarations d'invention et de brevets, à des projets de pré-maturation et de maturation (voir Section D4). Cette activité augmente la collaboration avec les structures de valorisation du site (Service Partenariat Valorisation CNRS, institut CARNOT, A\*Midex). Un poste IR CDD est notamment actuellement co-financé CNRS/CARNOT (2020-2022) pour renforcer les activités plateformes du laboratoire, et trois postes IR/IE CDD A\*Midex ont été obtenus (par appel d'offre) dans les plateformes *Diffusif* (2019) et *Photonique* (2019,2021). Les équipements disponibles des plateformes *Photonique* et *Diffusif* sont présentés en Annexe 3.

**Plateforme Couches minces optiques.** Etablie en 2014 suite à des investissements importants (CPER, FEDER, CD13, Ville de Marseille et tutelles), la plateforme couches minces optiques de l'Espace Photonique a été labellisée (AMU/CNRS) de 2017 à 2021. Elle comprend 200 m<sup>2</sup> de salles blanches et grises et un ensemble d'équipements à l'état de l'art dédiés au développement de filtres optiques interférentiels. Trois ingénieurs, quatre chercheurs et une demi-douzaine de doctorants travaillent au quotidien sur la plateforme pour un total de l'ordre 100 k€ de projets industriels et 150 k€ de projets académiques par an en moyenne. Ces activités ont rejoint le réseau RENATECH+ qui coordonne à l'échelle nationale l'ensemble des équipements de pointe dans le domaine de la micro et nanotechnologie.

**Plateforme Photonique.** Le nombre grandissant de demandes académiques et industrielles autour des activités couches minces (composants, caractérisation), imagerie et caractérisation pour les interactions forts flux nous a amené à élargir le périmètre de la plateforme couches minces aux activités matures dans les domaines de l'imagerie et de la caractérisation, pour les unifier pour plus de visibilité sous une même plateforme *Photonique*, labélisée Aix Marseille Université/CNRS en 2021. La plateforme Photonique réunit aujourd'hui environ 20 personnels permanents EC/C, 6 IT (dont une IR instrumentation recrutée en mobilité en 2020), et en moyenne 3 CDDs IE/IR et une quinzaine de doctorants : ce qui équivaut à 7 ETPT spécifiquement dédiés à la plateforme. Cette plateforme possède les outils récents les plus matures développés à l'Institut Fresnel dans les domaines des couches minces optiques, de la photonique de puissance et de la microscopie optique avancée (dont certains instruments n'existent pas commercialement ni dans d'autres plateformes au niveau international). Ces équipements représentent ainsi un investissement total de l'ordre de 10 M€. La plateforme met à disposition de la communauté scientifique (matériaux, photonique, biologie, biomédical), et du monde socio-économique (spatial, laser, télécommunications, pharmaceutique, cosmétique...) ces infrastructures pour l'exécution de contrats de recherche, de collaborations partenariales ou de prestations de services externes. Les activités de prestation sont coordonnées par les chercheurs, dans des modalités définies avec les tutelles. La plateforme photonique cherche en particulier à dédier du personnel à ces activités d'ouverture vers l'extérieur, tout en en faisant bénéficier les recherches par des fonds et directions nouvelles. Les recettes des contrats industriels et prestations au cours de ces 5 dernières années sont de l'ordre de 250 k€/an, de même que les contrats avec les établissements publics (CNES, CEA, SATT...). Ces recettes permettent principalement d'assurer la maintenance du matériel, son renouvellement, et les soutiens RH nécessaires à son fonctionnement (typiquement 1 CDD par an sur les machines couches minces, 2 CDD par an sur les instruments d'imagerie caractérisation). A cela s'ajoutent un grand nombre de projets ANR et projets Européens qui sont possibles grâce aux outils de la plateforme. La plateforme a également bénéficié pendant la période d'un projet région (MANACO, 120 k€ région + 120 k€ fonds propres) pour l'acquisition d'un microscope en champ proche et d'un spectrophotomètre. Enfin une partie conséquente (1.3 M€) du projet Equipex+ IDEC est destiné à développer des équipements avancés hybridant approches numérique et microscopie, pour l'imagerie avancée pour la biologie et le biomédical. Ces outils rejoindront, à terme de la phase de développement, le parc d'instrument ouvert aux utilisateurs. Ce projet s'accompagne de soutien RH CDD (IR 24M) obtenu dans le cadre d'un appel RH Plateforme A\*Midex (2021).

11 brevets associés à des activités composants ou imagerie réalisées au sein de la plateforme ont été déposés au cours de la période dont certains sont en cours de négociation pour un transfert vers l'industrie. Cette plateforme souffre en revanche d'un manque de personnels ITAs dédiés, ce qui demande un investissement conséquent des chercheurs et enseignants/chercheurs de ces thématiques.

Enfin, entre 20 et 30 publications sont issues chaque année de travaux réalisés dans la plateforme. La plateforme *Photonique*, complémentaire des activités de recherche qui sont réalisées quotidiennement au sein de l'I. Fresnel, joue un rôle important dans la politique scientifique du laboratoire et illustre notre capacité à faire évoluer des outils et compétences de recherche vers des moyens uniques et robustes ouverts aux utilisateurs extérieurs ainsi qu'à prendre en compte les besoins évolutifs du monde socio-économique.

**Plateforme Diffusif.** *Diffusif* est une plateforme de métrologie et d'instrumentation optique de précision par et pour la lumière diffuse, labélisée Plateforme technologique d'Aix Marseille Université en 2017. DIFFUSIF implique 3 personnels permanents et environ 6 CDDs et doctorants, couvrant les aspects expérimentaux et théoriques. Elle compte aujourd'hui une dizaine d'instruments originaux et innovants permettant de mesurer, analyser la lumière diffusée (BPDF, Haze, diffusion blanche, speckle, ellipsométrie du speckle, diffusion spectrale, spatialement, angulairement résolue, Visible, PIR, THz...) et d'en extraire de l'information (pertes optiques, rugosités, défauts, surface/volume, analyse de composants optiques, sondage de milieux désordonnés, analyse de végétaux...). Les différents instruments sont conçus et développés en interne en fonction des besoins scientifiques lorsque ceux-ci nécessitent une métrologie extrême. Certains d'entre eux sont amenés à devenir pérennes à la demande de la communauté.

Ces différents instruments constituent depuis leur création l'état de l'art international. Leurs performances sont en effet supérieures de plusieurs décades à celles des meilleurs instruments existants pour la métrologie de la lumière diffuse, ce qui en fait l'une des plaques tournantes européennes de l'instrumentation pour les composants optiques de pointe, en particulier pour les applications spatiales qui sont parmi les plus exigeantes. En découle une activité contractuelle forte avec les différents acteurs industriels du domaine qu'ils soient régionaux (CILAS Ariane Group, Thalès - SESO, Bertin Technologies...), nationaux (SODERN Ariane Group, Astrium, Saint Gobain Recherche, Thales, Sagem D.S., PSA Groupe/Stellantis, Thales Alenia Space, MERSEN BOOSTEC...) ou internationaux (Airbus Defense and Space, Oerlikon / RUAG, Zeiss, Viavi Solutions, TFS, Iridian, Hendsoldt...). La plateforme DIFFUSIF est considérée comme centre d'expertise et plateforme de référence par les agences spatiales française (CNES) et européenne (ESA) ainsi que par la Direction Générale de l'armement (DGA/AID) qui participent en conséquence au financement de son évolution ainsi qu'à la définition des choix stratégiques des nouveaux développements. Plus récemment, la plateforme DIFFUSIF a été sollicitée, après validation par l'ESA, pour intégrer en 2018 le consortium du grand projet LISA, Laser Interferometer Space Antenna, porté par l'ESA, la NASA avec le support de l'ensemble des agences spatiales européennes dont le CNES. Le projet LISA

visé au développement de la prochaine génération d'interféromètres pour la détection d'ondes gravitationnelles. Son intégration au sein de la collaboration Advanced Virgo est actuellement en cours.

Du fait de son positionnement stratégique en termes de technicité, performances et savoir-faire, la plateforme DIFFUSIF est devenue un centre de compétences régulièrement sollicité par les académiques, industriels et donneurs d'ordre. Elle arrive en conséquence à être autonome financièrement sur les aspects matériels : la plateforme totalise sur la période environ 500 k€ de recettes industrielles et 500 k€ de projets R&T avec le CNES. Les financements RH associés à la plateforme sont de l'ordre de 400 k€ et 500 k€ du projet Equipex+ IDEC seront fléchés sur le développement d'un nouvel instrument pour la plateforme. Du fait de cette forte activité, les difficultés rencontrées sont associées au faible nombre de RH permanentes (3 dont 2 départs à la retraite imminents pour 6 CDDs financés sur fonds propres). Cela pose donc la question de la pérennisation du savoir-faire et du positionnement français à moyen terme.

**Plateau technique : Optique pour le Biomédical.** Ce plateau technique datant de 2018, est hébergé à CERIMED. Il offre un parc instrumental dédié à la caractérisation et à l'imagerie quantitative non invasive des tissus biologiques. Elle implique deux personnes (1 permanent/1 non permanent, en moyenne) et comprend plusieurs diffusomètres (grande dynamique, résolution spectrale, prototype de mesure instantanée de BRDF, adaptable pour expérimentation in vivo), plusieurs dispositifs d'imagerie optique large champ (imagerie de Mueller, imagerie de polarisation), deux systèmes d'imagerie photoacoustique (dont un résolu spectralement), un système de Tomographie Optique Cohérente (OCT) à haute résolution. Son implantation partielle sur le site du CERIMED (Centre Européen de Recherche en Imagerie MÉdicale, faculté de médecine de la Timone) favorise une interaction privilégiée avec le milieu médical. Les champs d'application couvrent un large spectre (qualification de tissus biologiques, efficacité de médicaments ou de produits cosmétiques). Certains projets marquants sont le projet Amidex Transfert, Mediquem (Metrologie par diffusion lumineuse pour la quantification d'efficacités médicamenteuses), en partenariat avec APHM, Horus Pharma, le projet Gravity en partenariat avec CEA Neurospin, INP, LMA, LP3 : développement d'une méthodologie de traitement par photothermie du glioblastome, le projet EU ATTRACT SmartOpsy en partenariat avec U. Oulu : nouvelles approches en imagerie de polarisation quantitative, le pProjet L-iOS ANR-16-CE19-0012-01 en partenariat avec le CHU Toulouse, CEA-LETI, LPL, ACTIA : développement d'un capteur pour le suivi non invasif de fonctions biologiques (oxygène, glucose...). Le budget est de 50-100 k€ / an. Son objectif est, à terme, le passage à un mode de fonctionnement plateforme.

**Plateau technique : chambre anéchoïque** du Centre Commun de Recherche en Micro-ondes (CCRM), principalement opérée par des personnels de l'Institut Fresnel a été créée en 1989. Elle est exploitée par trois personnes et elle est essentiellement utilisée pour des projets collaboratifs et de formation (1,5 thèses et des formations Polytech et AMU). Les développements en cours concernent majoritairement l'analogie microonde (13 RICL) avec plusieurs projets dans différents domaines de l'Astrophysique. Elle constitue un support au projet interdisciplinaire 80 | Prime EXPERTS (EXploring Planet formation with lab ExpeRimentS : Mesures des propriétés optiques des poussières circumstellaires par analogie micro-onde) dont le prolongement a été obtenu au travers d'un ERC Advanced Grant obtenu (Dust2Planet). Elle fait partie intégrante du projet Equipex+ IDEC (Imagerie et Détection computationnelles) qui permettra sa rénovation (500 k€). Les budgets sont actuellement gérés par le CCRM, il est envisagé de les transférer en gestion CNRS dans un futur proche.

Par ailleurs le responsable de l'équipe IMOTHEP est responsable de la plateforme R&D Clinique CERIMED centre d'imagerie médicale multimodale <http://www.cerimed-web.eu/clinical-dept/> Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) (Neuroimagerie structurelle et fonctionnelle, Imagerie du Corps, Environnement de stimulation) ; Développements technologiques (Séquences d'acquisition Validation d'antennes Intégration instrumentale Stimulation Protocoles fonctionnels) ; Imagerie Moléculaire (Biodistribution et Pharmacocinétique Validation diagnostique et thérapeutique Environnement de stimulation) ; Expertise et Développements (Instrumentation Protocoles d'acquisition Radiopharmaceutiques Traitement d'image Interprétation médicale).

## Synthèse de l'autoévaluation

Le niveau d'attractivité et de rayonnement de l'unité est élevé et couvre des thématiques très variées, signe du grand dynamisme des thèmes et des projets que les chercheurs mettent en place. L'unité a montré un niveau soutenu de production scientifique (malgré la période de crise sanitaire traversée), Les interactions entre domaines, disciplines et thèmes, ont abouti à des résultats importants et originaux au niveau international. L'activité valorisation et des plateformes est grandissante et bénéficie aux retombées sur la recherche. Le fonctionnement conjoint de ces volets, la nature interdisciplinaire des recherches, et l'équilibre recherche fondamentale / recherche appliquée, nécessite cependant des ressources RH et infrastructure conséquentes qu'il est nécessaire d'augmenter pour assurer un fonctionnement pérenne. Enfin les recherches dans des domaines autres que l'ingénierie et la physique (sciences du numérique, mathématiques appliquées, sciences de la vie, médical) requièrent une attention particulière sur le soutien de ces recherches, des carrières des personnels, et de l'attractivité des jeunes chercheurs et étudiants. Il semble notamment important que le

rattachement d'étudiants en thèse soit rendu possible non seulement à l'Ecole Doctorale ED62 (Sciences De la Vie) mais également à l'ED184 (sciences Mathématiques et Informatique).

## Domaine d'évaluation 3 : Production scientifique

### Référence 2. La production scientifique est proportionnée au potentiel de recherche de l'unité et répartie entre ses personnels.

Au total sur la période, 790 articles à comité de lecture ont été publiés par l'Institut Fresnel, avec un total de citation moyen de 12. Certaines publications ont été publiées dans des revues à très fort impact (Nat. Materials, Nat. Communications, Light: Science & Applications, Optica, IEEE...). Les journaux les plus représentés dans la production de l'unité sont les journaux de physique-optique et de nanoscience, et environ 45 publications relèvent de la recherche purement médicale exercée par les personnels AP-HM de l'équipe IMOTHEP. Le nombre de publications et de citations depuis la création de l'I. Fresnel, indiqué dans la Figure 13, montre une croissance de 30% du nombre d'articles moyens par an sur 2016-2021 par rapport à 2011-2015 (ceci peut être au moins partiellement lié à une meilleure prise en compte de notre affiliation officielle par les auteurs). Les personnels de l'unité publient de manière significative en collaboration avec des partenaires, qui sont majoritairement le CEA, les unités de région parisienne (Universités Paris Cité, Paris Saclay, ESPCI) et de province (Grenoble, Lille, Montpellier, Lorraine, Toulouse, ...), les unités INSERM, l'APHM.... Parmi les institutions étrangères les co-auteurs sont principalement de l'Université de Rochester USA, l'ICFO / Université de Barcelona Espagne, l'Imperial College London UK, l'University of Sydney Australie, ITMO, Max Planck Institute, ...

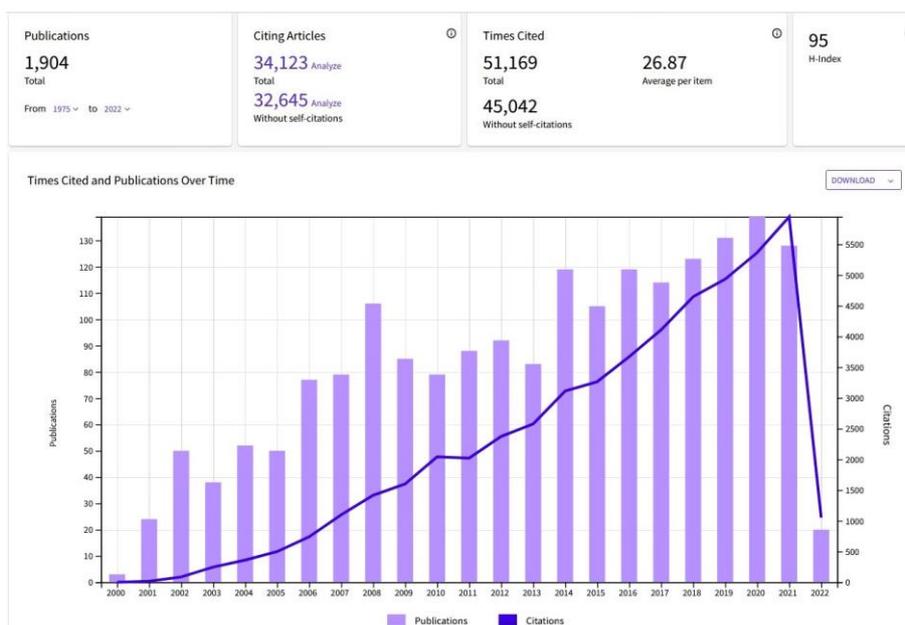


Figure 13 : production scientifique de l'I. Fresnel depuis sa création (source ISI Web)



Figure 14 : Journaux les plus fréquents de la production de l'I. Fresnel sur 2016-2021 (source ISI Web)

Les détails de cette production scientifique par thèmes, ainsi que d'autres indicateurs de l'activité (contrats importants, activités d'animation à l'échelle internationale) sont donnés dans les parties suivantes, destinées à la description des thèmes. De manière générale, la production en termes de publications RICL (Recherche Internationale à Comité de Lecture) est relativement équilibrée entre les thèmes (10.9/permanent = 2.9/ETP/an sur la période pour le thème Electromagnétisme, 10/permanent = 2.4/ETP/an pour le thème Nanophotonique et Composants, 8/permanent = 2.1/ETP/an pour le thème Information et Photonique, et 8.4/permanent = 1.9/ETP/an pour le thème Imagerie) (ETP : équivalent temps plein, 0.5 pour les EC). Les co-publications entre équipes ou entre thèmes sont en nombre croissant : 79 publications (10%) sont co-publiées entre équipes différentes sur la période, et nous comptons 31 co-publications entre thèmes différents. Ces co-publications concernent 13% des publications du thème Nanophotonique et Composants, de l'ordre de 8-9% pour les trois autres thèmes. Ceci illustre une dynamique importante entre équipes et thèmes, les frontières scientifiques étant naturellement modelables par les scientifiques de l'unité. Enfin au moins 7 doctorants ont été co-encadrés par des membres d'équipes différentes, voire de thèmes différents.

### Référence 3. La production scientifique de l'unité respecte les principes de l'intégrité scientifique, de l'éthique et de la science ouverte.

**Caractère honnête et scientifiquement rigoureux.** Par la nature même de leur objectif voulu par les personnels de l'unité, les communications scientifiques reposent sur des résultats obtenus dans le souci d'une science rigoureuse et honnête, et sont à 100% référées par des pairs. La sensibilisation des plus jeunes (doctorants) au sujet est effectuée, pour tous, par des formations à l'école doctorale et si besoin lors des comités de thèse (voir Section D2R2). La juste prise en compte des contributions des co-auteurs est effectuée par les responsables scientifiques, les cas de désaccords (inexistants sur la période) étant directement discutés avec la direction.

**Partage des données, des publications et des codes.** La traçabilité des données de la recherche est assurée par les cahiers de laboratoire et sur les ordinateurs au sein de l'unité. Les codes open sources accessibles sont en nombre grandissant et les personnels sensibles à la démarche d'un accès libre, qui est rendu possible par le cadre d'un espace de dépôt au sein de l'I. Fresnel (<https://oajlab.fresnel.fr>). Il est à noter qu'un nombre grandissant de journaux exigent que les publications soient accompagnées de données brutes et des codes associés au traitement de ces données. Pour cette raison l'unité met en œuvre une démarche commune de stockage des données sur serveurs gérés par le service informatique (financés sur projet ou par la dotation du laboratoire). La traçabilité, la conservation et l'accessibilité des données de recherche pour une réutilisation éventuelle (données FAIR) sont aujourd'hui un élément important des recherches, et notamment lorsqu'elles impliquent des collaborateurs utilisant les équipements de l'unité par une voie collaborative ou de plateforme. Ainsi l'unité s'inscrit progressivement dans une démarche de plan de gestion de données qui s'étend de plus en plus aux projets de recherche (PIA compris), permettant un accès organisé aux données dès lors qu'elles ne sont pas protégées. Des outils de plan de gestion des données et de logiciels (tels que <https://dmp.opidor.fr/> outil d'aide à la création en ligne, mis à disposition de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, hébergé et géré par l'Inist-CNRS) sont de plus en plus utilisés car ils incluent les aspects de protection et d'archivage garantissant traçabilité, reproductibilité et éventuellement réutilisation. Les tutelles sensibilisent les personnels porteurs de nouveaux projets à ces questions.

**Mise en place de démarche de science ouverte.** L'Institut Fresnel est sensible à la nécessité de mettre en place une politique globale de science ouverte, et suit dans ce sens les directives et actions requises par les tutelles. Pour cela l'unité a mis en place depuis 2016 non seulement le dépôt systématique par les auteurs sur HAL de

chaque publication et acte de conférence acceptés, mais également l'accès systématique aux documents scientifiques de ces publications. Le suivi des dépôts HAL est effectué régulièrement par le référent 'publications et science ouverte' de l'unité, et conditionne un bonus de la dotation récurrente par la tutelle AMU. Ces trois dernières années, plus de 95% des publications soumises étaient correctement référencées avec document accessible en ligne.

**NB : dans les parties qui suivent dédiées aux thèmes, les références citées utilisent les numéros de citation du fichier excel « 2-hceres-vague-c-der-donnees\_de\_production\_et\_dactivites », onglet « 1-JOURNAUX REVUES ».**

## Equipe (thème) n° 1 – Modélisation Electromagnétique

### Prise en compte des recommandations du précédent rapport (les commentaires synthétisés sont présentés en rouge)

**C1. Une réflexion pourrait être menée afin de permettre l'augmentation de la diffusion des résultats.** Les activités de recherche effectuées dans le thème Modélisation électromagnétique ont été menées avec une attention particulière portée sur la diffusion des résultats. La nature amont et théorique des recherches permet de diffuser les résultats de différentes manières : partenariat avec des industriels, organisation de conférences, code numérique en accès libre... Surtout, à travers l'interdisciplinarité, les résultats et les concepts innovants établis en optique et en électromagnétisme sont déclinés et diffusés dans de nombreuses disciplines classiques des sciences de l'ingénieur : acoustique, mécanique, élasticité, mécanique des fluides, thermique, géosciences, génie civil et thermique.

**C2. Risque de déséquilibre entre membres du thème. Le nombre de conférences invitées (11) semble faible pour un groupe ayant une grande renommée internationale.** Le nombre de conférences internationales invitées sur la période 2016-2021 est de 58, soit 1,1 par an et par ETP recherche. Tous les axes de recherche développés dans le thème Modélisation électromagnétique contribuent significativement à la production scientifique et à sa qualité, avec un rayonnement assez homogène au sein du thème qui peut prendre des formes différentes : conférences internationales invitées, direction de numéro spéciaux dans des revues, collaborations prestigieuses ou stratégiques, et organisation de conférences nationales et internationales.

**C3. Une dizaine de partenariats industriels ont été identifiés, mais en contrepartie seulement 3 contrats industriels (montants faibles : 20 k €) et 3 thèses CIFRE sur la période de référence.** Sur la période 2016-2021, 5 projets financés par l'ANR ont impliqué des industriels et le travail de diffusion de la culture scientifique a été poursuivi, avec notamment une publication dans la revue franco-portugaise de sciences humaines Sigila. La nature amont et théorique des recherches ne se prête pas systématiquement à des partenariats avec l'industrie et à une diffusion directe des résultats vers les applications, mais de nombreux autres modes de diffusion des résultats ont été considérés comme indiqué ci-dessus en réponse au C1 : organisation de conférences, code numérique en accès libre, interdisciplinarité et diffusion de la culture scientifique.

**C5. Encourager les doctorants à participer à la vie du thème de manière générale. Quelques doctorants ont été embauchés par une startup issue du thème, mais un suivi plus systématique du devenir des doctorants serait le bienvenu.** Les membres du thème Modélisation électromagnétique ont particulièrement contribué à associer les doctorant(e)s et les jeunes chercheur(e)s de l'Institut Fresnel et en France dans le réseau national du groupe thématique Modélisation et simulation (GT1) du GDR Ondes du CNRS. A l'occasion des journées thématiques du GT1 du GDR Ondes de 2018 et 2019, des sessions spéciales « jeunes chercheur(e)s » (doctorant(e)s et postdocs) ont été organisées par des jeunes chercheur(e)s (animation) et pour des jeunes chercheur(e)s. Ensuite, en période de pandémie COVID-19 et de confinement en 2020-2021, une série de 14 webinaires a permis à 28 jeunes chercheur(e)s de présenter leurs travaux à la communauté nationale en « Modélisation et simulation des ondes » en visioconférence (40 à 60 connexions) : cette action a répondu à une forte attente de nombreux jeunes chercheur(e)s car cela a constitué pour certain(e)s une unique occasion de présenter leurs travaux à la communauté nationale pendant la pandémie (voire pendant leur doctorat) et, avec leur autorisation, de mettre en ligne la présentation de leurs travaux sur la chaîne YouTube du GDR Ondes (32 vidéos en lignes dont 20 de jeunes chercheur(e)s) : <https://www.youtube.com/channel/UCpbiNzySSPbfjk3EEA4OMew/videos>. Ces actions ont pleinement bénéficié aux doctorant(e)s et postdocs en modélisation électromagnétique de l'Institut Fresnel.

**C6. Avec la nouvelle organisation en thèmes, il faudra peut-être réorganiser les équipes afin de répondre aux nouveaux défis lancés.** Le thème Modélisation électromagnétique a mis en place un mode de fonctionnement collégial qui a permis sur la période de formuler plusieurs demandes de moyens communs et transverses à toutes les équipes et thématiques impliquées dans le thème : un profil de poste en modélisation électromagnétique (recrutement prioritaire à l'Institut Fresnel), équipement de calcul numérique haute performance avec l'entraînement d'autres laboratoires sur le site d'Aix-Marseille et manifestations d'intérêt pour participer au PEPR « Electronique ». Par ailleurs, les membres du thème organisent et participent, de façon coordonnée, à des

conférences nationales et internationales avec, par exemple, la présentation de l'ensemble des méthodes numériques (de modélisation électromagnétique) développées à l'Institut Fresnel aux journées thématiques du GT1 du GDR Ondes.

## Description des activités de recherche du thème 1 - Modélisation électromagnétique.

Les activités de recherche du thème de modélisation électromagnétique de l'Institut Fresnel contribuent à tous les aspects de modélisation des ondes électromagnétiques classiques – analyse mathématique, décomposition modale, modélisation numérique, simulation expérimentale, modélisation asymptotique – et à la conception d'applications en optique diffractive, en optique guidée, en optique linéaire et non-linéaire, et dans le domaine de la protection des ondes. Les 23 membres permanents de l'Institut Fresnel participant à ces activités de recherche sont des ingénieur(e)s, des enseignant(e)s-chercheur(e)s et des chercheur(e)s issu(e)s de 8 équipes de recherche (ATHENA, CLARTE, CONCEPT, DIMABIO, EPSILON, HIPE, MOSAIC, SEMO) et du service commun en informatique et représentent 8.8 ETP/an (équivalent temps plein). Un total de 17 doctorants, 8 post-doctorants et 30 stagiaires ont été accueillis.

Les recherches effectuées dans ce thème s'appuient sur des connaissances et des instruments développés sur le long terme et reconnus sur la scène internationale : la modélisation numérique rigoureuse des ondes électromagnétiques, une chambre anéchoïque hyperfréquence, l'étude des réseaux et des cristaux photoniques, les métamatériaux et la conception de composants en optique diffractive et guidée. Pendant les 6 années 2016-2021, plusieurs résultats marquants ont été obtenus : la modélisation des structures dispersives par un développement sur les modes de résonance (ou QNM pour *quasi-normal mode*) ; la simulation expérimentale hyperfréquence de plusieurs effets remarquables en optique ; des premières preuves mathématiques sur l'existence et la localisation de points de Dirac dans la structure de bandes dans un cristal photonique hexagonal à fort contraste ; la modélisation numérique de structures photoniques longues de plusieurs centaines de longueurs d'onde, structurées à l'échelle de la longueur d'onde et fortement résonantes ; la proposition de structures réalistes où les non-linéarités sont exaltées d'un facteur 50 par rapport à des structures classiques ; la conception d'une métasurface pour un dispositif d'affichage innovant ; la conception d'un métamatériau avec des arbres pour la protection contre les ondes sismiques.

Pendant la période 2016-2021, la production scientifique associée à ce thème est de 153 articles et de 58 présentations invitées dans des conférences internationales. Ces travaux ont été soutenus par 7 projets financés par l'ANR, 3 projets financés par l'Europe et 1 projet financé par AMidex et ont été effectués en partenariat avec des acteurs économiques (groupe Ménard/Vinci, PSA) et dans le cadre de collaborations internationales (Liège, Valencia, Londres, Liverpool, Karlsruhe, Berlin, Chine, Etats-Unis...) et nationales (LP2N, C2N, POEMS, LAAS, LCF, FEMTO-ST, Institut Langevin, ISCR...), la liste n'étant pas exhaustive. Ces travaux de recherche ont également abouti à des activités de rayonnement avec l'animation du groupe thématique « Modélisation et simulation » (GT1) du GDR Ondes, la direction du réseau de recherche franco-chinois en photonique « IRN PHOTONET » et l'organisation de manifestations scientifiques pendant la période 2016-2021 : 2 *workshops* du GT1 du GDR Ondes sur la modélisation des ondes à Paris et à Marseille, 1 série de 14 webinaires du GT1 du GDR Ondes sur la modélisation des ondes en 2020-2021 (32 vidéos et plus de 1500 vues sur la chaîne YouTube du GDR Ondes), 2 *workshops* de l'IRN PHOTONET sur la photonique à Wuhan (2019) et Hangzhou (2021, hybride) en Chine, 2 *workshops* internationaux sur les métamatériaux à Marseille et l'organisation à Marseille de l'édition 2017 du congrès international *Metamaterials* qui a rassemblé plus de 400 participants. Cette reconnaissance internationale dans la thématique des métamatériaux s'est également traduite par la direction de deux doubles volumes dans la revue *Comptes Rendus Physique* de l'Académie des sciences en accès diamant (accès libre et gratuit pour tous).

### 1. Modèles théoriques, numériques et expérimentaux en électromagnétisme

#### 1.1 Analyse mathématique des systèmes dispersifs et des structures périodiques

Des recherches sur les équations de Maxwell sont effectuées dans le cadre étendu du formalisme dit « des champs auxiliaires » qui permet d'analyser rigoureusement, avec les théorèmes sur les opérateurs autoadjoints, les systèmes électromagnétiques dispersifs et absorbants. L'originalité de l'Institut Fresnel a été d'identifier dès 2010 [J. Math. Phys. 51, 052902 (2010)] l'intérêt de ce formalisme non seulement pour les métaux en optique, mais aussi pour les « matériaux » composites (métamatériaux, cristaux photoniques, réseaux de diffraction et métasurfaces) qui sont nécessairement dispersifs. Ainsi, ce formalisme a permis d'exploiter la théorie spectrale pour démontrer la validité des principes d'absorption limite et d'amplitude limite dans le cas d'un problème de transmission entre un diélectrique et un métamatériau [Cas17 : <https://arxiv.org/abs/1610.03021>, Cas22 : <https://arxiv.org/abs/2110.06579>].

Par ailleurs, les résultats obtenus ont notamment mis en évidence l'équivalence entre les principes physiques de la causalité et de la passivité et les propriétés analytiques des grandeurs physiques : la fonction de Green électromagnétique [Gra17], les relations de dispersion dans les structures périodiques [chapitre d'ouvrage Gra18 : <https://arxiv.org/abs/1807.01658>] et la permittivité [Cas17b :

<https://arxiv.org/abs/1703.05178>. Ces propriétés ont permis d'exploiter la représentation de Herglotz – pouvant être considérée comme une généralisation des relations de Kramers-Kronig – pour établir des relations fondamentales concernant la permittivité [Cas17b : <https://arxiv.org/abs/1703.05178>] et les limites de l'invisibilité avec des systèmes passifs [Cas17c : <https://arxiv.org/abs/1610.08592>]. Enfin, les propriétés analytiques ont été utilisées pour définir une représentation des solutions des équations de Maxwell sur des modes quasi-normaux aussi bien en régime temporel [Abd18] qu'en régime fréquentiel [Ism18] : dans ces modélisations, la dispersion, la causalité et l'analyse complexe garantissent l'absence de croissance exponentielle, la régularisation et la complétude des modes.

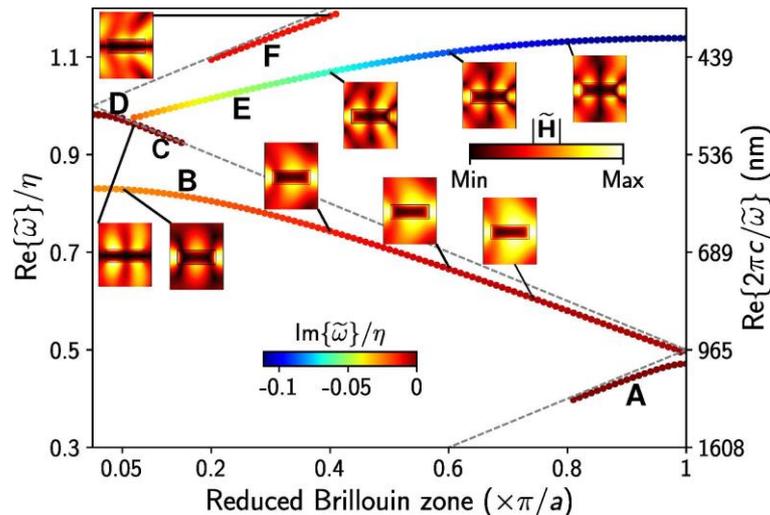
$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_0 \left( 1 - \int_{\mathbb{R}} \frac{d\nu(\xi)}{\omega^2 - \xi^2} \right)$$

**Figure T1-1** : Théorème de représentation de Hergotz-Nevanlinna de la permittivité d'un milieu causal et passif [Gra17, Cas17b : <https://arxiv.org/abs/1703.05178>].

Plus récemment, des recherches ont été menées sur les isolants topologiques [Cas21b] et sur les analogues électromagnétiques d'ondes de trou noir [Gra20], qui sont tous deux des phénomènes physiques remarquables. L'Institut Fresnel a développé une collaboration [Cas21b] avec l'université de Columbia, New York sur la modélisation des cônes de Dirac dans les cristaux photoniques et a obtenu des premières preuves mathématiques sur l'existence et la localisation de points de Dirac dans la structure de bandes dans un cristal hexagonal à fort contraste [Cas21b]. Ce thème constitue un secteur de recherche en plein essor en physique mathématique et dans différentes branches de la physique ondulatoire. Enfin, il a été montré que les modes électromagnétiques de surface d'une pointe métallique présentent une singularité et sont capturés par le sommet de la pointe se comportant de façon analogue à un espace semi-infini ou à un trou noir [Gra20]. Ces derniers travaux éclairent sur les difficultés rencontrées lors de la modélisation numérique de toutes structures métalliques présentant des arrêtes (2D) ou des coins (3D).

## 1.2 Méthodes numériques pour la diffraction et l'analyse modale

Différentes méthodes numériques sont développées et utilisées à l'Institut Fresnel : la méthode modale de Fourier, la méthode des éléments finis, la méthode intégrale de volume (thème « Imagerie ») et la méthode intégrale surfacique (surfaces rugueuses et milieux désordonnés). Ainsi, la méthode modale de Fourier a été couplée à un algorithme d'optimisation (*global clustering*) pour une application de filtrage en optique [Feh17] (voir §3.1) et adaptée pour modéliser la génération de seconde harmonique dans des structures sub-longueur d'onde résonantes longues (voir §3.2). Une nouvelle méthode originale de calcul des modes vectoriels au sein des structures photoniques non-linéaires (effet Kerr) a été développée en s'appuyant sur la méthode des éléments finis et un algorithme de calcul des modes non-linéaires dit « à puissance fixée » [Els17, Els18] (cf §3.2). Des travaux significatifs portent sur le calcul des modes quasi-normaux pour calculer de façon efficace la solution des équations de Maxwell. En présence de dispersion en fréquence, le problème spectral pour le calcul des modes devient non-linéaire puisque les propriétés optiques des matériaux dépendent de la valeur propre recherchée. Une première étape a consisté à se munir d'un modèle – à la fois causal et représentatif de la réalité expérimentale – de permittivité représentée par une fraction rationnelle fonction de la fréquence avec un nombre de pôles arbitraires [Gar17 : <https://arxiv.org/abs/1612.01876>]. Plusieurs stratégies de linéarisation compatibles avec les éléments finis ont été mises au point pour le calcul des modes quasi-normaux (QNM) en présence de dispersion. Un modèle open-source pour les problèmes aux valeurs propres dits non-linéaires résultant de cette prise en compte de la dispersion a été élaboré à partir des logiciels Gmsh/GetDP (collaboration avec C. Geuzaine, université de Liège) et la bibliothèque SLEPc (collaboration avec J. E. Roman, université de Valencia) [Dem20]. Ces modèles ont fait l'objet d'un travail conséquent de *benchmark* impliquant plusieurs méthodes alternatives et équipes internationales spécialistes du sujet [Lal19]. Ces travaux de *benchmark* ont notamment permis d'identifier numériquement des analogues d'ondes de trou et les perturbations qu'ils engendrent dans le calcul des valeurs propres [Lal19, Dem20]. Enfin, des formules très générales d'analyse modale ont été introduites [Nic18, Duy20] en s'appuyant sur le théorème de Keldysh. Cette technique permet de reconstruire tout champ diffracté sur la base des QNM.

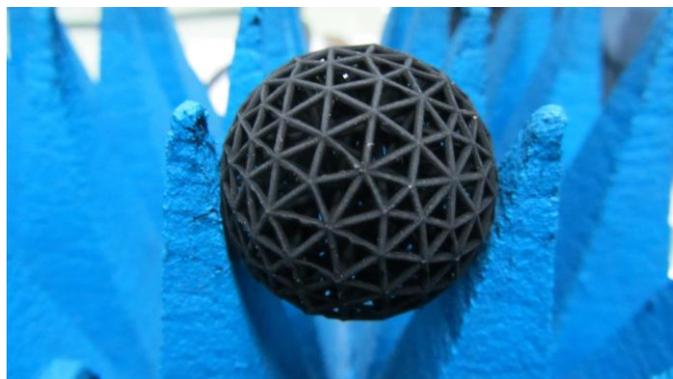


**Figure T1-2 :** Fréquences de résonances complexes d'un réseau de diffraction et QNM associés.

### 1.3 Simulation expérimentale hyperfréquence

L'analogie micro-onde permet, par un changement d'échelle gardant constant le rapport entre les dimensions de l'objet étudié et la longueur d'onde, de simuler des expériences aux longueurs d'onde de l'optique avec des moyens expérimentaux en hyperfréquence. Les objets étudiés sont « simplement » agrandis en gardant le même indice qu'en optique. La géométrie et l'indice [Sal21] de ces « analogues » sont donc plus facilement maîtrisables et ceci permet de caractériser précisément l'interaction entre l'onde incidente et la cible en amplitude et en phase dans un environnement parfaitement contrôlé (chambre anéchoïque) [Bar18], [Bar17], [Sal17]. En développant l'instrument et les capacités de réalisation d'analogues, des problématiques de plus en plus variées ont été étudiées. Plusieurs effets ont ainsi été démontrés expérimentalement : la directionnalité de rayonnement d'un doublet de particules diélectriques haut-indice [Tri16, Bar18] ; un effet de commutation parfait en fonction de la polarisation résultant de l'interaction électrique (ou magnétique) mutuelle entre deux particules haut-indice [Bar17] ; la combinaison de méta-atomes haut-indice à résonance dipolaire magnétique unique pour produire des facteurs de qualité infinis et des effets de transparence [Abu19, Abu21] ; un concept de source d'Huygens large bande [Abd19], l'effet du nombre de mesures sur la précision des mesures de diffusion moyennes [Ren21].

A l'inverse, l'analogie micro-onde permet aussi étudier des objets de très grandes tailles avec une réduction d'échelle pour aller d'une longueur d'onde de quelques mètres vers une longueur d'onde de quelques centimètres, la taille des cibles étant alors réduite proportionnellement. Ces études concernent la diffraction par des arbres [Het19 : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01620053/>] ou l'interaction d'une onde électromagnétique avec des comètes ([Sor20-theme1, Eyr20], voir aussi le thème imagerie) ou des particules circumstellaires (projet multidisciplinaire 80 | Prime EXPERTS).



**Figure T1-3 :** Sphère composite à l'échelle millimétrique pour simuler une sphère diélectrique de bas indice en optique.

## 2. Modèles asymptotiques

En complément des méthodes de modélisation électromagnétique *full-wave* présentées dans la section précédente, il est utile de développer des méthodes asymptotiques qui permettent de modéliser, dans un certain domaine de validité, des systèmes de plus grandes dimensions, de plus grande complexité ou de façon plus efficace. Ainsi, des recherches sont développées pour faire le pont entre l'électromagnétisme et l'optique géométrique (§2.1), entre l'équation de transport radiatif et l'équation de diffusion (§2.2) et entre les milieux structurés et les milieux effectifs homogènes (§2.3). Des travaux plus spécifiques portant sur un modèle classique de la supraconductivité [Sze17, Sze18, Sze19] et sur l'imagerie (avec phase et sans phase) de petites particules polarisables [Bar18b, Cas17d : <https://arxiv.org/abs/1703.03544>] ne sont pas présentés ci-après.

### 2.1 Equations de Maxwell et optique géométrique

Grâce au formalisme des faisceaux gaussiens généralisés, nous avons exploré les frontières entre l'électromagnétisme et les rayons optiques [Alo19]. Nous avons étudié les limites des faisceaux « auto-similaires », dont le profil transverse reste inchangé au cours de sa propagation et dont les propriétés sont intéressantes pour la microscopie. Nous avons montré que les concepts tels que les vecteurs de Jones ou la sphère de Poincaré, normalement utilisés pour caractériser la polarisation, peuvent être aussi utiles pour représenter la distribution spatiale de ces faisceaux [Mal18 : <https://arxiv.org/abs/1805.10381> , Gut19]. Plus généralement, leur étude constitue un pont théorique idéal pour comprendre les corrections asymptotiques nécessaires à d'autres modèles, plus précis (équations de Maxwell) ou plus grossier (optique géométrique). Enfin, nous mettons en parallèle les approximations classiques faites en mécanique quantique (équation de Schrödinger) et celles faites pour ces faisceaux [Esa2019].

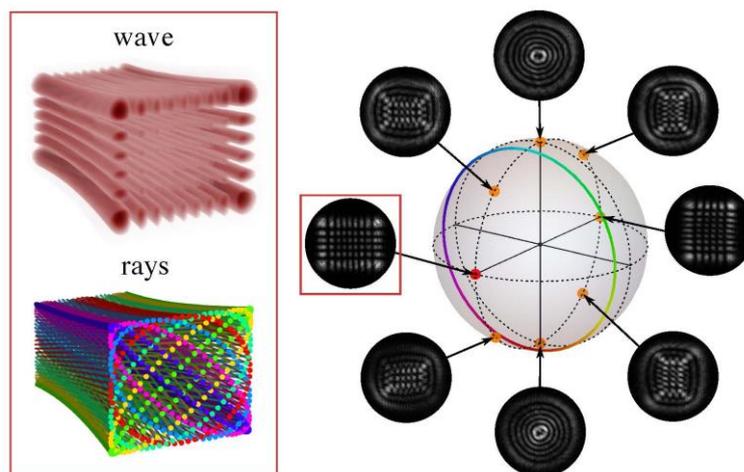


Figure T1-4 : Modélisation des ondes électromagnétiques par des faisceaux auto-similaires.

### 2.2 Equation de transfert radiatif et équation de diffusion

L'approximation de diffusion est couramment appliquée à l'équation de transport radiatif (ETR), en optique biomédicale pour décrire la propagation de la lumière dans les tissus. Cette approximation a été améliorée en optimisant un paramètre ajustable du modèle classique lié au taux de décroissance exponentielle de l'intensité réduite. Avec cette optimisation, les calculs obtenus avec l'équation de diffusion résultante deviennent beaucoup plus proches de ceux obtenus avec l'ETR, avec le bénéfice d'une complexité de calcul beaucoup plus faible [Tri18]. L'approximation de diffusion est aussi généralement utilisée en tomographie par corrélation diffuse pour résoudre le problème inverse d'une version modifiée de l'ETR : l'équation de transport de corrélation. Il a été proposé de résoudre ce problème inverse avec des simulations Monte Carlo et une expression analytique du noyau de sensibilité obtenue avec l'approximation de Born. Cette méthode fournit plus d'informations spatiales que l'approximation de diffusion, améliorant ainsi la résolution spatiale de la tomographie par corrélation diffuse, et permet d'explorer des degrés de liberté supplémentaires comme la direction de collimation des sources et des détecteurs [Tri18b]. Ces méthodes sont appliquées à l'imagerie dans les tissus vivants (voir le thème « Imagerie » de l'Institut Fresnel).

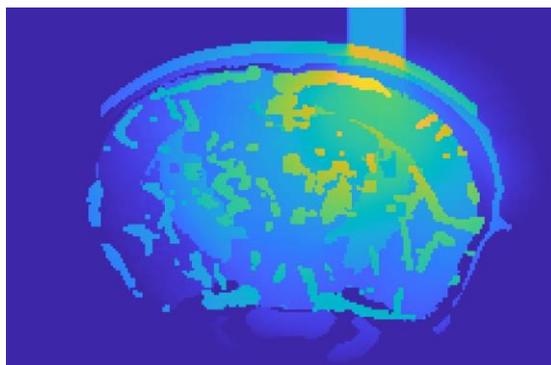


Figure T1-5 : Image d'un cerveau de souris.

### 2.3 Homogénéisation et milieux effectifs

Des modèles d'homogénéisation ou de milieux effectifs sont élaborés à l'Institut Fresnel pour modéliser de façon simple des structures hétérogènes, généralement périodiques, afin de prédire leurs propriétés ou de concevoir des composants. Des systèmes variés ont fait l'objet d'études : une théorie de la permittivité effective pour les réseaux métalliques [Pop18] ; l'homogénéisation dite « hautes-fréquences » a été appliquée en élastodynamique pour mettre en évidence une anisotropie extrême [Lef17] ; une analyse asymptotique a été utilisée pour modéliser une forêt d'arbres de hauteur croissante exploitée pour convertir et dévier des ondes sismiques de surface vers des ondes de volume en profondeur [Mau18] ; l'homogénéisation de structures quasi-périodiques issues d'une coupe et projection de structures périodiques dans un espace de dimension supérieure [Wel17] ouvre une voie originale vers des métamatériaux mécaniques isotropes aux basses fréquences ; un modèle de milieu effectif d'une structure multicouche diélectrique a permis de montrer que dans les milieux passifs la partie imaginaire de la perméabilité magnétique prend des valeurs positives et négatives [Gra20].

## 3. Applications

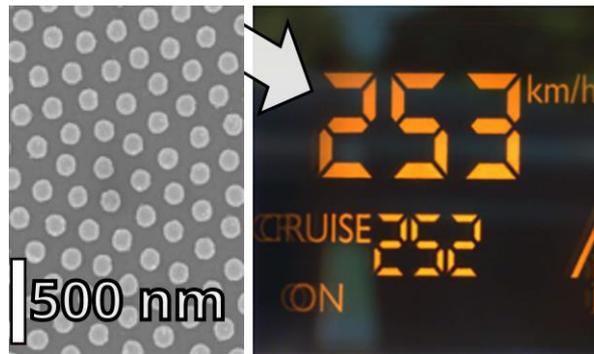
Les méthodes de modélisation sont exploitées pour concevoir des applications en optique diffractive avec des réseaux de diffraction et des métasurfaces, en optique guidée et pour le contrôle des ondes avec des métamatériaux.

### 3.1 Milieux structurés linéaires en optique

La combinaison de notre code maison basé sur la méthode modale de Fourier avec un algorithme d'optimisation (voir §1.2) nous a permis de proposer une structure originale pour le filtrage en transmission accordable en fonction de l'angle d'incidence [Feh17]. Par ailleurs, nous avons poursuivi nos études sur les fibres optiques micro-structurées linéaires en étudiant dans des fibres torsadées les effets de taille finie de la gaine micro-structurée [Nap19].

Les connaissances en modélisation théorique (indices effectifs, §2.3) et numérique (méthode modale de Fourier et éléments finis, §1.2) des réseaux métalliques ont été utilisées pour proposer des métasurfaces optiques qui permettent de réfléchir, avec une grande efficacité, différentes couleurs en fonction de la polarisation tout en restant globalement transparentes [Ber18]. Ces surfaces planes nanostructurées sont très prometteuses pour des dispositifs d'affichage innovants, la vision tête haute ou la réalité augmentée. Ces travaux en collaboration avec le C2N et l'industriel Groupe PSA ont été couronnés par un article dans la lettre innovation du CNRS de septembre 2018 (numéro 45).

Une technique novatrice de fabrication par impression 3D de préforme de verres de chalcogénures a été développée à l'Institut des Sciences Chimiques de Rennes (ISCR). Cette technique a permis la première fabrication d'une fibre optique microstructurée à cœur creux issue d'une préforme obtenue par impression 3D, fibre spécialement conçue pour l'infrarouge via une modélisation numérique tenant compte des contraintes de fabrication. Cette fibre a été caractérisée dans une large bande de l'infrarouge et les fenêtres de transmission observées ont été correctement reproduites via l'utilisation de la théorie de modes couplés entre 7 et 9,6  $\mu\text{m}$  [Car21]. La conception et les modélisations des fibres [Car21] ont été réalisées à l'Institut Fresnel grâce à 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.

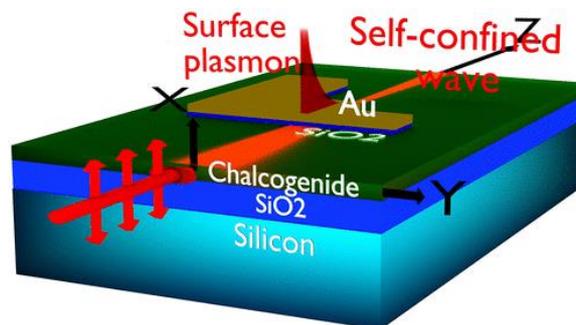


**Figure T1-6** : Conception et réalisation d'un prototype de système d'affichage optique pour l'industriel Groupe PSA (La lettre innovation du CNRS, septembre 2018 et [Ber18])

### 3.2 Milieux structurés non-linéaires en optique

La nouvelle méthode numérique de calcul des modes non-linéaires [Els17, Els18] (voir §1.2) a permis : 1) d'exhiber des structures réalistes où les non-linéarités sont exaltées d'un facteur 50 par rapport à des structures isotropes ; 2) de revisiter la définition du paramètre non-linéaire « gamma » – coefficient devant le terme non-linéaire du champ électrique dans l'effet Kerr optique dans l'équation de Shrödinger non-linéaire –, très souvent utilisé dans l'étude des guides d'onde non-linéaires ; 3) de généraliser la définition de ce paramètre à des structures non-linéaires anisotropes et d'étendre son interprétation à des valeurs complexes [Els18b]. Dans le cadre d'expériences en optique non-linéaire intégrée nous avons pu participer via la modélisation à la caractérisation d'un nouveau verre de chalcogénure très prometteur car hautement non-linéaire et peu photosensible au-delà de  $1,3 \mu\text{m}$  [Kur17]. Grâce aux méthodes numériques spécifiques et à l'expertise acquises par plus de dix années de recherches dans l'étude des non-linéarités spatiales au sein des guides d'onde, une structure photonique *ad-hoc* permettant la première observation mondiale d'ondes non-linéaires auto-confinées au sein de structures plasmoniques a été conçue, fabriquée, et caractérisée [Kur20]. Cela faisait plus de quarante ans que ces ondes non-linéaires avaient été prédites par des travaux théoriques américains et russes. Les mesures ont pu être analysées et comparées avec succès aux résultats des simulations numériques. Ce travail a été proposé et piloté par l'Institut Fresnel et a réuni deux autres équipes françaises (ISCR pour la fabrication et FEMTO-ST pour la caractérisation).

Nous avons aussi poursuivi le développement de la modélisation (méthode modale de Fourier, éléments finis et méthode des dipôles couplés) des réseaux résonnants en cavité (CRIGF), structures longues de plusieurs centaines de longueurs d'onde, structurées à l'échelle de la longueur d'onde et fortement résonantes [Cha16-theme1, Cha17-theme1] pour montrer la possibilité de générer des effets non-linéaires du second ordre (génération de seconde harmonique, SHG) [Ren19]. Cette expertise est aujourd'hui utilisée pour explorer des solutions originales de renforcement de la SHG, comme l'excitation d'un mode sombre de la structure [Feh21].



**Figure T1-7** : Structure photonique *ad-hoc* permettant la première observation mondiale d'ondes non-linéaires auto-confinées au sein de structures plasmoniques

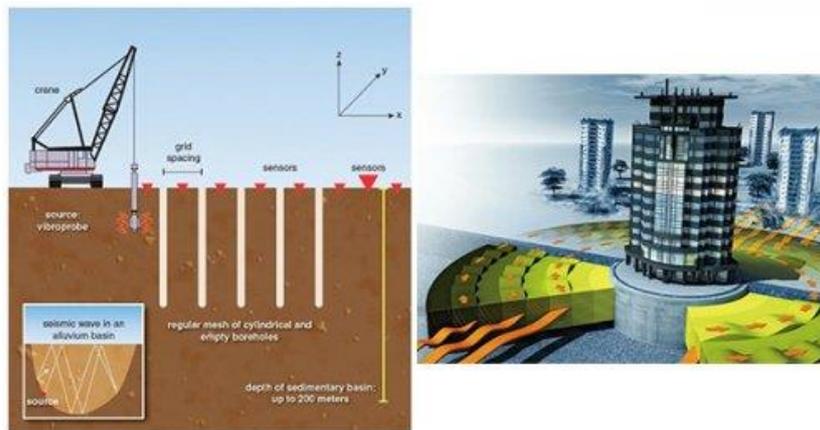
### 3.3 Conception de métamatériaux par analogie des équations d'onde

L'originalité des travaux menés à l'Institut Fresnel dans la thématique des métamatériaux a été de transposer les concepts imaginés en électromagnétisme aux autres équations d'onde. Ainsi, l'Institut Fresnel a joué un rôle important dans le développement des métamatériaux acoustiques, mécaniques et hydrodynamiques, notamment dans le domaine de l'invisibilité aux vagues et aux ondes sismiques de surface (Love et Rayleigh) pour la protection des zones côtières [Dup17] et la protection des bâtiments dans les bassins sédimentaires

[BRU19]. Cette thématique était soutenue par un financement européen ERC entre 2011 et 2016. Enfin, des phénomènes physiques à l'instar de l'invisibilité ont pu être étendus à des équations non plus propagatives mais diffusives. Dans ce cadre, il a été montré [Cas21] mathématiquement et numériquement qu'en utilisant des pompes à chaleur à effet Peltier, on peut construire une cape surfacique thermique active permettant de rendre indétectable une source de chaleur ou un objet. Ces nouvelles capes innovantes ont fait l'objet d'une communication CNRS INSIS portée par l'Institut Fresnel.

A partir d'une analogie entre l'équation de Helmholtz et l'équation de diffusion, une cape biochimique constituée de feuillets de graphène enrobés d'acides aminés a été proposée pour le contrôle de la diffusion de drogues [Puv18] en collaboration avec le CRCM de l'Institut Paoli-Calmettes à Marseille et avec le soutien de l'initiative d'excellence AMIDEX jusqu'en 2018.

Enfin, les métamatériaux spatio-temporels, avec une permittivité dépendant de l'espace et du temps, ont été étudiés pour différents types d'ondes [Hui19]. Il a été montré que ces métamatériaux se comportent comme des milieux qui seraient en mouvement et, suivant le type de modulation spatio-temporelle de leurs paramètres acoustiques, électromagnétiques ou élastiques, qu'ils peuvent présenter des propriétés de non-réciprocité.



**Figure T1-8 :** Application des métamatériaux au contrôle des ondes sismiques par structuration des sols.

### Référence 1. La production scientifique de l'équipe satisfait à des critères de qualité.

Sur la période 2016-2021, la production scientifique du thème Modélisation électromagnétique comprend 153 publications dans des revues internationales à comité de lecture (RICL), ce qui équivaut en moyenne à 26 RICL par an et 2.9 RICL/ETP/an (en comptant 8.8 ETP recherche pour le thème). Ces articles scientifiques sont publiés le plus souvent dans des revues d'optique (principalement dans les revues de Optica publishing group, anciennement Optical Society of America) et de physique (principalement dans les revues de Physical Review de l'American Physical Society). Par ailleurs, une particularité du thème est de publier des articles dans des revues spécialisées dans des disciplines différentes, attestant du caractère interdisciplinaire des recherches effectuées dans le thème : journaux de mathématiques, calcul scientifique, élasticité, mécanique, acoustique, mécanique des fluides, géoscience, génie civil, sciences humaines, astrophysique et supraconductivité. Des articles du thème sont publiés dans des revues à fort impact : Nature Communications, ACS Photonics, ACS Nano, Phys. Rev. Lett., Laser and Photonics Reviews. La proportion d'articles impliquant des partenaires internationaux s'élève à 44% (soit 69 articles). Enfin, les recherches menées au sein du thème ont été présentées dans 58 conférences invitées internationales sur la période 2016-2021.

### Référence 2. La production scientifique est proportionnée au potentiel de recherche de l'équipe et répartie entre ses personnels.

Tous les axes de recherche développés dans le thème Modélisation électromagnétique contribuent significativement à la production scientifique et à sa qualité. Tous les doctorants du thème participent à cette production scientifique et 55 publications (36%) du thème impliquent au moins un doctorant.

### Synthèse de l'autoévaluation

Les recherches développées dans le thème Modélisation électromagnétique sont à vocation plus théorique et plus fondamentale. Ainsi, la production scientifique et le nombre de publications sont un point fort avec par exemple 2.9 RICL/ETP/an. Ces recherches sont également largement reconnues, aussi bien aux niveaux national et international, avec de nombreuses collaborations prestigieuses, l'organisation de nombreuses

conférences et l'animation et la participation à des réseaux de recherche. Le thème s'avère attractif auprès des jeunes chercheurs avec presque tous les ans des candidat(e)s au concours chargé(e) de recherche du CNRS et le recrutement d'un jeune chercheur en 2017 (et donc pas de candidature soutenue en 2018-2019).

Une contrainte rencontrée au sein du thème est la difficulté d'obtenir des financements pour les recherches amonts ou théoriques, les projets avec applications étant plus facilement financés. Cela se traduit par un déficit de doctorant(e)s ou postdoctorant(e)s sur des activités dont la finalité principale consiste au développement de nouvelles méthodes théoriques et numériques. Par ailleurs, les formations (masters) associées à l'Institut Fresnel et à l'école doctorale Physique et sciences de la matière (ED 352) ne sont pas pleinement adaptées à ces activités plus amont et théoriques du thème. De plus, l'absence d'affiliation de membres de l'Institut Fresnel avec l'Ecole doctorale Mathématiques et informatique (ED 184) est un obstacle supplémentaire pour recruter des doctorant(e)s au profil recherché.

## Thème n° 2 – Nanophotonique et Composants

### Prise en compte des recommandations du précédent rapport

**C1. Vu l'excellent niveau de production scientifique, peu de points sont à améliorer.** Nous avons poursuivi nos efforts pour maintenir le haut niveau de production scientifique. Sur la période 2011-2015, nous avons publié en moyenne 25 articles par an. Sur la période 2016-2021, notre production s'élève en moyenne à 39 publications par an, en augmentation de plus de 50% par rapport à la période précédente. Parmi ces publications, 27 se placent dans des revues de facteur d'impact supérieur à 10.

**C2. Le thème doit poursuivre ses initiatives et sa participation à tous les concours et distinctions, qui révèlent son dynamisme, et qui contribuent à son attractivité. Le comité d'experts encourage les activités sur les couches minces et sur l'interaction lumière-matière aux forts flux à élargir leurs collaborations à l'international.** Les membres du thème ont obtenu 23 prix scientifiques au cours de la période 2017-2021. Les collaborations internationales ont également été développées, avec notamment des programmes d'échanges (République Tchèque, Togo, Australie) et des collaborations internationales (projet H2020 ITN GREAT). Près d'une vingtaine de publications sur les couches minces et sur l'interaction lumière-matière aux forts flux résultent de collaborations internationales.

**C3. Le principal risque réside dans l'activité de prestation qui doit se limiter aux besoins uniques, et dans le cadre de développements en accord avec la stratégie du thème et de l'Institut.** Les collaborations non-académiques avec les partenaires du monde socio-économique ont été développées, notamment avec la reconduction de deux laboratoires communs avec CILAS Ariane Group, et PSA Group / Stellantis et la création d'un troisième avec le CEA. Ces interactions vont bien au-delà de la simple prestation de services et nous laissent une large part pour déterminer notre politique scientifique. De plus, ces activités collaboratives avec les partenaires ont conduit au dépôt de 6 brevets sur la période.

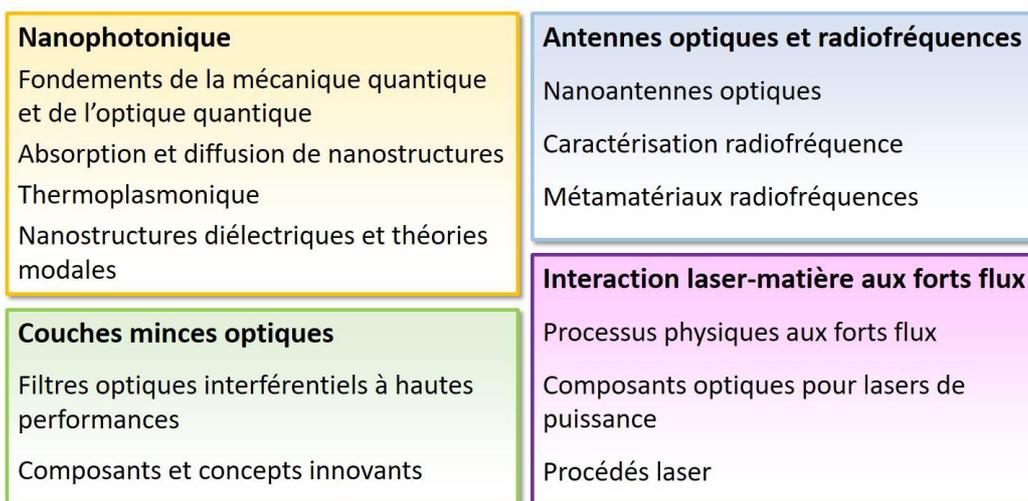
**C5. Le thème effectue un travail remarquable de formation par la recherche. Il ne reste qu'à recommander de maintenir ce niveau de qualité, et d'impliquer les doctorants dans la vie du thème et du laboratoire.** Les réunions ainsi que les séminaires du thème sont ouverts à tous les membres du laboratoire, avec une volonté affichée de voir assister un maximum les doctorants. Nous avons également veillé à proposer tous les séminaires en anglais pour éviter toute barrière de langue vis-à-vis des collègues non-francophones. Des séminaires de doctorants ont été organisés, mais la crise sanitaire covid a malheureusement eu un impact très négatif sur l'animation scientifique en présentiel.

**C6. Le thème 2 doit prendre en compte la demande croissante de prestations au niveau de la plateforme photonique, avec la mise en place des moyens financiers et humains adéquats, afin de ne pas empiéter sur l'activité recherche, de premier plan. Enfin le thème 2 est encouragé à pérenniser sa cohésion par des actions d'animation scientifiques internes.** Sur la période 2016-2019, des séminaires d'animation ont eu lieu avec un rythme d'un séminaire par mois, ce qui permet d'ouvrir à tous les membres du laboratoire. Les besoins tant en moyens humains que d'équipements lourds ont été discutés au niveau du thème, notamment lors des remontées annuelles de l'outil DIALOG. Concernant l'activité Couches Minces, l'activité recherche a été renforcée au cours de ces 6 dernières années, puisqu'elle a contribué à 5 projets ANR, 8 projets R&T CNES, 1 projet H2020 ITN et près d'une cinquantaine de publications scientifiques faisant intervenir les moyens technologiques de la plateforme. Un CDD AI est dédié à 100% aux activités de la plateforme depuis 2,5 ans, mais les moyens humains mériteraient d'être encore augmentés pour répondre à l'ensemble de demandes académiques et industrielles.

## Description des activités de recherche du thème 2 - Nanophotonique et Composants.

Manipuler les ondes électromagnétiques et contrôler la lumière sont au cœur de l'optique. Au-delà des composants photoniques classiques, les nouvelles méthodes de fabrication offrent des technologies innovantes pour réaliser des fonctions inédites telles que des filtres optiques microstructurés ou des antennes résonantes sub-longueur d'onde. Nos activités s'articulent autour de 4 axes principaux :

- Nanophotonique
- Antennes optiques et radiofréquences
- Couches minces optiques
- Interaction laser-matière aux forts flux



Une des forces de l'Institut Fresnel est de disposer de toutes les compétences clefs pour concevoir, modéliser, réaliser, caractériser et mettre en application les nouveaux composants optiques. Les activités de cette thématique se situent très en amont (nanophotonique, antennes optiques...) et également très en aval avec les développements sur les couches minces et l'endommagement laser. Cet éventail d'orientations scientifiques est un des points forts de la thématique qui peut s'appuyer sur des expertises variées et complémentaires.

Le thème développe un haut niveau de publications scientifiques dans des revues de forte visibilité internationale. Ce rayonnement est appuyé par la reconnaissance obtenue par les membres du thème (81 conférences invitées sur la période, 21 prix et distinctions scientifiques). Le thème est également très actif pour l'obtention de contrats de recherche émanant du monde académique (13 contrats européens et internationaux, 22 contrats ANR) et des partenaires socio-économiques (20 contrats R&D, 3 Labcoms, 1 chaire industrielle). 27 colloques ou congrès ont été organisés par les membres du thème au cours de la période 2016-2021. Tous ces éléments contribuent au rayonnement de l'Institut Fresnel et assurent son attractivité.

Pour mener ces activités, le thème s'appuie sur l'Espace Photonique regroupant 250 m<sup>2</sup> de salles blanches et grises dédiées au dépôt de couches minces. Pour réaliser et caractériser les nouveaux composants optiques, l'Institut dispose également de différentes chaînes laser de puissance, de 4 salles de chimie, d'un microscope électronique combiné à un faisceau d'ion focalisé FIB, d'un microscope à force atomique AFM et de nombreux bancs de caractérisation optique.

Le thème a fédéré 33 permanents répartis en 19 enseignants-chercheurs ; 8 chercheurs ; 6 techniciens, ingénieurs et autres personnels, pour un équivalent temps plein recherche de 16.3 ETP/an. Un total de 53 doctorants et 43 post-doctorants et 93 stagiaires ont été accueillis.

Ce thème possède naturellement de forts liens avec le thème « Modélisation Electromagnétique » au travers du développement et de l'application de nouvelles méthodes de résolution des équations de Maxwell. Par ailleurs, des liens importants sont tissés avec le thème « Imagerie », notamment autour des applications des nanostructures pour les biocapteurs et le contrôle de la température. Enfin, les liens avec le thème « Information & Photonique » s'articulent autour des thématiques de la polarisation, de la cohérence optique et de la diffusion lumineuse dans les composants optiques complexes.

### Nanophotonique

Dans cette partie, on s'intéresse à des structures de dimensions nanométriques pour contrôler et manipuler la lumière à des échelles sub-longueur d'onde.

### Aspects fondamentaux de la mécanique quantique

Bon nombre d'applications porteuses dans le domaine de la photonique peuvent se comprendre en restant dans une approche classique. De plus en plus souvent, cependant, la théorie quantique devient un ingrédient indispensable [D'A19]. Dans le domaine des technologies quantiques, le développement de sources et détecteurs à un photon est devenu incontournable. En métrologie, la miniaturisation croissante des composants optiques amène de plus en plus souvent théoriciens et expérimentateurs à prendre en compte les degrés de liberté quantiques du problème. La recherche menée à l'Institut Fresnel reflète ces évolutions et couvre les thématiques suivantes :

- Aspects fondamentaux de l'émission de lumière par un atome [Las20] : décohérence quantique, fonction d'onde du photon [Deb16], fonctions de Green QED, quasi-normal modes [Las18], couplage fort [Bra18].
- Aspects fondamentaux de la théorie quantique : tests d'effets gravitationnels [Col16b,Col17b,Dur21] et/ou de non-linéarités dans le régime quantique [Dur16,Dur21b], équilibre quantique [Hat18].
- Nouvelles technologies quantiques : information quantique, communication quantique, cryptographie quantique, générateurs quantiques/photoniques de nombres aléatoires [Car17].

### Absorption et diffusion de nanostructures

Les propriétés d'absorption et de diffusion, linéaire ou non linéaire, de nanostructures ont été utilisées et étudiées avec trois objectifs principaux : (i) contrôler la lumière, (ii) contrôler une autre grandeur physique, notamment la température et (iii) caractériser les nanostructures complexes.

Les nanostructures métalliques ont permis de contrôler la diffusion de la lumière, incidente ou harmonique, soit au sein de nanoparticules individuelles en mouvement [Ber19] soit au sein de nanostructures plus complexes telles que les métasurfaces, pour encoder de l'information [San18]. De manière similaire, mais en génération de second harmonique, des nano étoiles plasmoniques ont été développées cette fois, pour optimiser l'efficacité non linéaire [Rou19,Dub19].

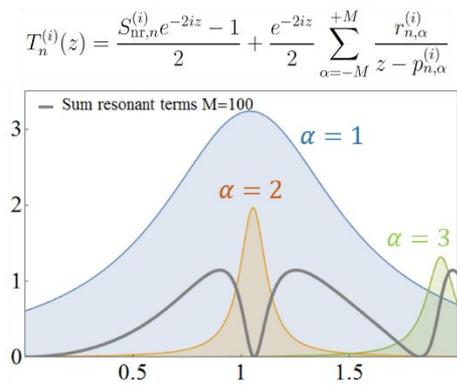
L'absorption à deux photons a été exploitée pour induire une photopolymérisation localisée [Zha18]. Les propriétés de diffusion ont également été utilisées sur des nanoparticules pour développer des capteurs de molécules biologiques [Via17a,Via17b]. Enfin, la diffusion non linéaire de second harmonique a été utilisée pour étudier et retrouver l'organisation orientationnelle de l'eau liquide, due à son fort dipôle statique, aux échelles nanométriques [Dub18].

### Thermoplasmonique

L'absorption de lumière par des nanostructures plasmoniques est un domaine de recherche à part entière, appelé la thermoplasmonique [Baf17(livre),Baf21 (Nature Materials review)], très actif depuis une dizaine d'années. L'absorption de nanoparticules d'or permet de générer et contrôler des champs de température aux petites échelles, avec des applications dans de nombreux domaines de la sciences (physique, chimie, biologie et biomédical). L'absorption en plasmonique peut être bénéfique ou indésirable, mais dans les deux cas, il est important de quantifier les élévations possibles de température, une réelle difficulté quand il s'agit de le faire aux échelles nano/micrométriques [Baf21 (Anti-Stokes Thermometry in Nanoplasmonics), Baf20 (LSA)].

Ces 5 dernières années, l'institut Fresnel a continué d'avoir une activité soutenue en thermoplasmonique. Diverses techniques de microscopie thermique en plasmonique ont été utilisées [Rob16,Dur19,Tan20,Sha21] et inventées [Jia19]. Les études ont porté sur le chauffage nano/micrométrique de nanoparticules [Rob16,Sha21], de nano trous [Jia19,Jia20b], ou au sein de structures plus complexes afin d'obtenir des profils de température à façon aux échelles micrométriques [Met17,Dur19,Sha21], pour des applications en chimie [Rob16], thermophorèse de colloïdes [Sha21,Rob21], piégeage optique de nano-objets par des antennes plasmoniques assistées par température où nous quantifions pour la première fois l'influence de la composante de force thermique [Jia20,Jia21,Jia21b]

### Nanostructures diélectriques et théories modales



**Figure T2-1** : Spectre de diffusion d'une particule de silicium: contribution des 3 premiers modes dipolaires.

L'objectif de ces recherches est d'analyser et d'utiliser les résonances électromagnétiques dans des nanostructures diélectriques à haut indice de réfraction. Dans le cadre d'une collaboration avec l'Institut Langevin et l'INSP, nous avons démontré une manipulation des transitions dipolaires électriques ou magnétiques d'ions europium par l'intermédiaire de résonances magnétiques d'une antenne en silicium [San18] et avons utilisé un algorithme génétique afin de maximiser le champ proche magnétique [Bon19]. Nous avons également réalisé la première démonstration d'exaltation de fluorescence à l'échelle de molécules uniques avec des nanoantennes exclusivement en silicium [Reg16] et démontré une alternative viable aux antennes plasmoniques.

Nous avons consacré de larges efforts sur l'analyse modale de ces nanostructures pour réaliser des filtres spectraux [Woo17, Vas17]. Nous avons obtenu les expressions des expansions modales des opérateurs de diffusion (matrices S et T) [Sto17, Col18, Col19a].

Nous avons montré comment étendre ces expansions modales au domaine temporel en résolvant le problème de divergence [Col18]. Un intérêt particulier a été porté sur le lien entre le renforcement du champ à l'intérieur de la structure diélectrique et les pics de diffusion observés en champ lointain [Sto17, Col19a]. Le renforcement du champ interne trouve une application en optique non-linéaire : nous avons déterminé numériquement la géométrie d'un nano-disque de silicium pour qu'il ait 2 résonances dans le proche infrarouge et montré une exaltation de 2 ordres de grandeur du signal non-linéaire généré par un mélange à 4 ondes [Col19b]. La fabrication de nanostructures diélectriques en silicium et germanium a été étudiée en collaboration avec l'IM2NP en vue de générer des optiques sur substrat flexible [Ben20], des résonances étroites [Tol20] ou des structures hyper-uniformes [Sal20]. En collaboration avec d'autres groupes, nous avons rédigé une perspective et un article de revue sur les résonances de Mie pour les antennes optiques et les biocapteurs [Bid19, Kra18].

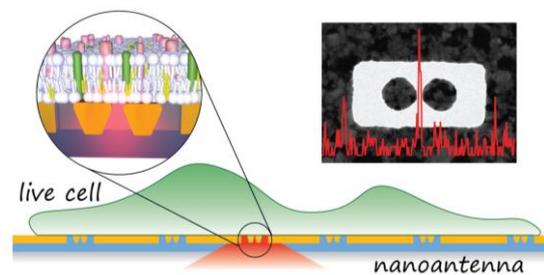
### **Antennes optiques et radiofréquences**

Emetteurs et structures résonantes peuvent être combinés pour contrôler en champ proche le processus d'émission en couvrant une large gamme spectrale de l'UV profond aux micro-ondes.

#### **Nanoantennes optiques**

Des nanostructures métalliques sont utilisées pour confiner le champ lumineux à des échelles nanométriques et exalter l'émission de fluorescence de molécules individuelles [Bid16]. Trois domaines de recherche ont été développés.

Le premier concerne l'élaboration de nanoantennes planarisées par un polymère. Ces antennes ont permis d'obtenir un record mondial d'exaltation de fluorescence [Fla17] et sont remarquablement adaptées à l'étude de membranes de cellules vivantes en combinant une résolution spatiale de 10 nm avec une résolution temporelle de 10  $\mu$ s [Reg17, Win17, Win18]. Ces travaux ont été menés dans le cadre d'un projet européen FP7-ICT en partenariat avec IFCO et l'EPFL et constituent une avancée majeure dans l'utilisation de nanoantennes plasmoniques pour sonder des membranes de cellules vivantes.



**Figure T2-2** : nanoantenne optique pour sonder les membranes cellulaires.

Le second axe de recherche porte sur le contrôle de l'interaction dipôle-dipôle par des nanostructures photoniques telles que des nanoantennes résonantes [Bid16c, de16b] ou des nanofils plasmoniques [de16b]. Dans le cadre d'une ANR en collaboration avec le Centre de Biochimie Structurale de Montpellier, nous avons montré une augmentation de l'efficacité de transfert d'énergie à des distances qui n'étaient jusqu'alors que très difficilement mesurables en microscopie classique [Bai19, Bai20b, Pat20]. En collaboration avec ICFO, ces concepts ont été étendus dans le cas d'antennes optiques fixées en bout de pointe NSOM qui est scannée au-dessus d'une molécule unique dont il s'agit de la première réalisation mondiale [San20]. Nous avons également développé une analogie originale avec le domaine des micro-ondes pour réaliser la première cartographie de transfert d'énergie entre dipôles en champ proche [Rus19, Rus21].

Enfin, le troisième et dernier axe concerne l'étude de nanostructures résonantes en aluminium [Bai20]. Les effets de résonance dans des réseaux bidimensionnels ont été caractérisés en partenariat avec l'Université de Technologie de Troyes [Lau17,Khl17]. Les applications pour la plasmonique dans l'ultraviolet ont débuté dans le cadre d'une ERC consolidator et ont notamment permis de mettre en évidence la détection de protéines sans marquage [Bar19b,Bar21]. Ces travaux ouvrent des perspectives nouvelles pour la photonique UV et la plasmonique sur aluminium. Nous avons notamment développé des solutions innovantes pour contourner le problème de la photocorrosion UV de l'aluminium qui est un défi largement impactant pour la communauté [Bar19,Roy21].

### Caractérisation radiofréquence

Les interactions avec les ondes électromagnétiques sont régies en grande partie au travers de la permittivité diélectrique complexe et de la perméabilité magnétique complexe des matériaux. La connaissance des caractéristiques électromagnétiques peut alors être considérée comme un élément incontournable pour déterminer d'autres paramètres physico-chimiques. Dans ce contexte, nous développons des techniques expérimentales innovantes et les adaptons aux applications et aux différents types de matériaux.

Lors d'une collaboration avec le Physikalisches Institute de Berne dans le cadre de la mission exploratoire cométaire Rosetta, nous avons pu réaliser des matériaux artificiels et analogues à ceux de la comète CG67/P et vérifier ainsi les valeurs des grandeurs diélectriques obtenues par les outils embarqués dans la sonde spatiale [Bro16,Bro16b]. Nous avons pu aussi vérifier les caractéristiques électromagnétiques de matériaux analogues lunaires et martien pour valider des modèles de sols martien [Bro19]. L'utilisation de la connaissance des grandeurs diélectriques en astrophysique est une des clefs dans la compréhension des phénomènes radar comme la géomorphologie de certains astres et étudiés avec les divers outils embarqués dans les sondes spatiales. A ce titre, en collaboration avec Essam Heggy et Elizabeth Palmer de l'université de Californie du Sud, nous avons testé des matériaux analogues nous permettant ainsi de valider que la surface de Cérés est plus poreuse que les régolithes lunaires [Pal21]. Dans une collaboration avec une équipe de chercheurs polonais de l'Institute of Agrophysics de Lublin, nous utilisons la connaissance des variations des grandeurs diélectriques pour diagnostiquer les teneurs en eau dans les sols dans l'objectif d'optimiser la gestion hydrique [Szy19]. Avec la DGA, nous menons une étude de la variation en fonction de la température et de la fréquence, des grandeurs électromagnétiques des matériaux de revêtement des avions d'armes [Let19]. En effet, l'augmentation importante des températures de surface de ces avions serait à l'origine de la diminution de certains paramètres de furtivité radar. Les températures atteintes sont de l'ordre de 200° [Let20].

Enfin, nous avons étudié des matériaux à très hauts indices pour des applications à l'imagerie IRM à très hauts champs. Les matériaux furent d'une part, des mélanges aqueux avec des poudres de pérovskites compressées [Nev17] et d'autre part, des matériaux artificiels et analogues à des tissus biologiques [Nev17b]. Enfin, toujours pour des applications en imagerie IRM très haut champs, nous avons étudié des matériaux pour des applications très ciblées [Dub18, Hur18].

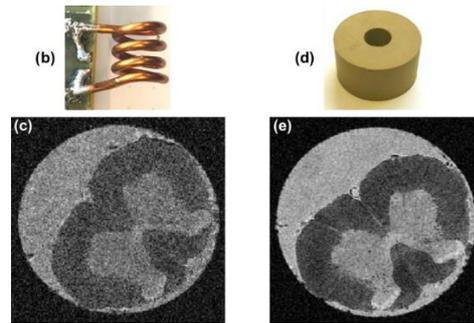
Depuis quelques années, nous utilisons cette grandeur diélectrique, la permittivité complexe, comme vecteur d'informations biomédicales. Actuellement un prototype de capteur doit permettre de remonter à certaines valeurs physiologiques comme la glycémie en utilisant le principe du sondage micro-onde [Bak21].

### Métamatériaux radiofréquences

Nos travaux sur les métamatériaux radiofréquences (RF) sont centrés autour de la problématique des antennes RF pour des applications en IRM, et plus principalement autour de deux axes principaux : (1) l'homogénéisation du champ RF d'excitation [Dub18b, Jou16, Hur20] sans augmenter l'absorption dans les tissus [Vig18b, Sol18] pour l'IRM ultra haut champ (3T et 7T), et (2) l'augmentation de la sensibilité et la réduction du bruit dans la chaîne de réception RF [Geo17]

Axe 1 : l'objectif est d'améliorer l'homogénéité du champ RF pour la transmission du signal dans les appareils IRM à ultra haut champ (7T). Lorsque le champ magnétique statique augmente, la fréquence de résonance des protons augmente (fréquence de Larmor). Ceci a pour effet de créer des effets d'interférences qui n'existent pas à plus bas champ et qui dégradent les images. Le principe que nous avons développé consiste à utiliser soit des PADS diélectriques [Nev17c] soit des métamatériaux comme éléments résonnants servant de sources secondaires proches de l'échantillon à imager afin de rehausser le champ RF là où il est trop faible [Dub18b, Vor20]. Cette démarche présente l'avantage de n'ajouter aucun composant actif ce qui assure le maintien d'un niveau d'absorption du champ RF (DAS) modéré. Ces travaux sont en cours de validation dans un contexte clinique. Ces travaux ont été menés dans le cadre du projet européen FET OPEN MCUBE, ils ont donné lieu à deux brevets licenciés auprès de la société Multiwave Imaging, la seconde solution est déjà commercialisée et utilisée dans des protocoles d'imagerie du cerveau.

Axe 2 : En IRM, on distingue trois leviers d'amélioration du rapport signal sur bruit : la durée d'acquisition, l'intensité du champ magnétique statique  $B_0$  et l'efficacité de l'antenne RF [Dub19b]. Nous avons développé une nouvelle génération d'antenne IRM diélectrique basée sur l'excitation de résonateurs céramiques [Mou20, Lez20]. Nous avons démontré sur un IRM petit animal que pour une même durée d'examen, nous pouvons au moins doubler le rapport signal à bruit [Mou19]. Ces activités ont été menées dans le cadre du projet européen MCUBE et de trois projets financés par l'Institut Carnot Star.



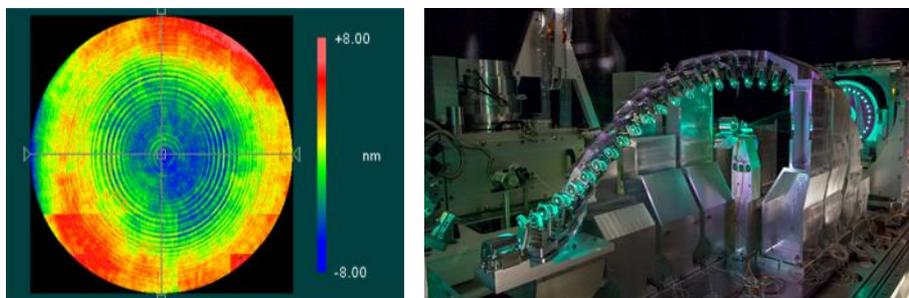
**Figure T2-3** : Antenne céramique (à droite) pour l'amélioration du rapport signal sur bruit en imagerie IRM.

## Couches minces optiques

### Filters optiques interférentiels à hautes performances

Une des thématiques historiques de l'Institut Fresnel concerne le développement de composants en couches minces optiques. Ceci est possible grâce à la plateforme technologique de l'Espace Photonique qui regroupe des moyens de production uniques en France. Trois domaines de recherche ont été développés. Le premier concerne les propriétés mécaniques des couches minces, à savoir les contraintes mécaniques. Ces dernières jouent un rôle crucial dans les performances finales des filtres fabriqués puisqu'elles vont les déformer et modifier en conséquence les fronts d'ondes réfléchis par ces composants. Nous avons développé des méthodes de mesures précises de ces contraintes (précision de  $\pm 5$  MPa) que nous avons appliquées aux couches utilisées pour les composants visibles, infrarouges [Beg17a] mais également les rayons X [Pro-18]. Le deuxième domaine concerne les méthodes de contrôle optique [Leq17,Nad18]. En effet, la réalisation de filtres optiques interférentiels présentant plusieurs dizaines voire centaines de couches nécessite de contrôler leurs épaisseurs avec une précision meilleure que le pourcent. Pour ce faire, nous avons développé un ensemble de méthodes et stratégies basées sur un contrôle optique in-situ de la transmission en cours de fabrication, qui permettent à ce jour de fabriquer des composants complexes de manière automatique [Vig17,Vig18,Vig19]. Ces travaux ont permis la mise en place d'une collaboration fructueuse avec la société Bühler, le fabricant des machines de dépôts que nous utilisons. Nous avons ainsi développé avec eux des nouvelles méthodes combinant contrôle optique monochromatique et large bande, et avons appliqué ces méthodes à la réalisation de divers composants avec des taux de succès de plus en plus importants [Zid21]. Enfin, nous avons appliqué les résultats de recherche des deux domaines cités ci-dessus pour développer et livrer un ensemble de composants optiques dans le cadre de différents projets de recherche académiques (e.g. spatial, laser) [Beg17b,Lem19,Beg19] ou pour des industriels (e.g. Bühler, Bertin Technologies) [Beg19,Lum17,Lum19].

Au-delà de ces structures à grand nombre de couches, nous nous sommes également intéressés au développement de structures intégrant des fines couches métalliques pour la colorimétrie. Ces travaux ont eu une portée grand public et sociétale, notamment dans le développement d'éléments de sécurité pour des billets de banque ou des documents officiels [Shu21][JL1] .



**Figure T2-4** : Exemples de miroirs ultraplats développés dans le cadre du projet ELI-NP.

### Composants et concepts innovants

Si les filtres hautes performances autorisent déjà un contrôle spectral très précis de la lumière, de nouvelles générations de composants innovants sont à l'étude. Ainsi, les travaux de synthèse de multicouches en régime de réflexion totale, basés sur un nouveau concept de couches d'admittance nulle [Amr18]), ont permis de générer et d'optimiser des exaltations géantes de champ électromagnétique. Les degrés de liberté sont nombreux (résonances arbitraires simultanées) et amènent ces composants à proposer une alternative sérieuse à la plasmonique, à la fois pour les capteurs (sensibilité accrue), les micro-sources (réduction de seuil) ou les

expériences pompe/sonde de façon plus générale. Les performances de ces composants ont été analysées en détail et ont permis d'intégrer les conditions d'utilisation dès la synthèse des composants [Ler17,Zer17,Amr18,Ler19,Niu20]. Nous avons ainsi travaillé, dans le cadre des travaux de l'OpenLab Stellantis/AMU, sur des capteurs ultrasensibles pour lesquels les détectivités mesurées en milieu liquide [Niu19] ont déjà rejoint l'état de l'art. Trois brevets ont été déposés [Aus16,Amr16,Amr16b] dont l'un étendu à l'international [Aus16]. D'autres applications plus récentes s'intéressent au développement de lames pour la microscopie à réflexion interne et notamment appliquée à l'imagerie de virus avec un contraste amélioré. Ces développements intègrent notamment les contraintes en termes de divergence angulaire et d'efficacité de collection imposée par la configuration du microscope. Ceci a fait l'objet d'un dépôt de brevet.

Nous nous sommes également intéressés à la macro-structuration de filtres optiques interférentiels afin d'obtenir des filtres variables spatialement. Ces filtres présentent un gradient d'épaisseur selon une direction du filtre et permettent, s'ils sont combinés à une matrice de détecteurs, de réaliser un imageur spectral compact. Nous avons ainsi montré qu'il était possible d'utiliser la technologie de pulvérisation cathodique magnétron et de la modifier en utilisant des masques mécaniques pour réaliser des gradients d'épaisseur et ainsi développer des filtres variables (linéaires ou non-linéaires) dont les performances spectrales restent identiques à celles des filtres uniformes utilisés dans le domaine spatial [Beg21]. Ces développements ont donné lieu à la livraison de différents lots de filtres au CNES qui ont été intégrés sur des matrices CCD et laissent entrevoir leurs applications pour des missions spatiales futures.

Une autre évolution vise la micro-et nano-structuration d'empilements multicouches. Nous nous sommes notamment intéressés à l'utilisation de couches minces à base de verres de chalcogénures et de leurs propriétés de variations d'indice de réfraction photoinduites pour la fabrication de différents éléments. Nous avons notamment montré l'application de ces couches pour la fabrication de filtres optiques interférentiels spatialement structurés [Bou19], d'éléments optiques diffractifs de volume, ou en collaboration avec la société Multiwave, de métasurfaces optiques à gradient de phase [Mik19] et de méta-lentilles planaires [Mik20].

Une troisième direction concerne l'étude de composants optiques massifs. Par exemple, le développement de plusieurs types d'interférométrie de cisaillement à travers une configuration compacte à trajet commun, en utilisant deux plaques parallèles identiques avec des distributions de biréfringence variant spatialement [Ale19a]. Une nouvelle approche est également présentée pour la conception de réflecteurs qui redirigent la lumière d'une source ponctuelle vers toute distribution d'intensité radiante souhaitée [Ale19a].

### **Interaction laser-matière aux forts flux**

Ce sujet fait l'objet de recherches principalement portées par les activités liées à l'endommagement laser des composants optiques pour lasers de puissance, qui s'est ouvert depuis quelques années à d'autres sujets applicatifs dans le domaine des procédés lasers.

### **Processus physiques**

Le fil conducteur des activités recherche est celui de la physique de l'interaction laser matière, en recouvrant des régimes très différents, allant des impulsions ultracourtes mettant en jeux des processus de photo-ionisation, jusqu'au régime continu basé sur des interactions principalement thermiques, en passant par le régime nanoseconde dans lequel interviennent des phénomènes d'interaction laser/plasma. Les travaux menés ont concerné par exemple l'étude des propriétés optiques de matériaux à haute température par le développement de systèmes expérimentaux originaux [Min17,Gal17,Min18], la détermination des réponses non-linéaires de nouveaux types de matériaux couches minces [Pol18,Moi20], l'analyse des processus physico-chimiques lors d'interactions laser/surface sur des matériaux optiques grâce au développement d'un banc permettant d'effectuer des mesures in-situ [Bea17, Wag17,Geb20], les mécanismes d'endommagement laser sur des verres de silice par la mise en œuvre d'outils statistiques [Vei17, Lam17] et l'interaction laser/couches minces dans des régimes sub-ps [Dou16, Gal16,Ras18, Oll20].

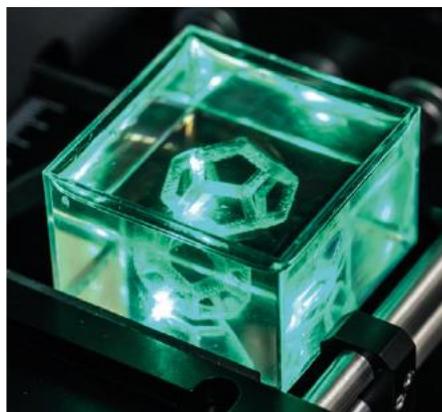
### **Composants optiques pour lasers de puissance**

Les connaissances acquises sur la compréhension des mécanismes physiques d'interaction laser matière et de dégradation sous fort flux laser, combinées à l'expertise du laboratoire dans le domaine des couches minces optiques et de l'électromagnétisme, permettent de progresser dans le développement de composants optiques pour lasers de puissance et faire apparaître le laboratoire comme un acteur de premier plan dans ce domaine. Dans le cadre de collaborations académiques et industrielles, ou en interne au laboratoire, nous participons ainsi au développement de procédés et technologies permettant d'améliorer la résistance au flux laser des composants optiques, élément clé pour le succès de nombreux projets d'envergure : Miroirs à large bande spectrale et à contrôle de dispersion utilisés sur le laser Apollon (collaboration LULI, LOA, REOSC) [Her17], Miroirs de transport pour le laser PETAL (collaboration CEA) [Cho18,Cho19,Oll19,Soz17,Lam21], Optiques en silice pour le laser LMJ (collaboration CEA) [Vei18,Lam19,Tou19], Systèmes embarqués pour le spatial (collaboration CNES) [Wag18,Geb18], Couches minces à faible absorption pour lasers de puissance (collaboration CILAS) [Liu17], nouveaux concepts de miroirs basés sur des structures à puits quantiques (collaboration LZH) [Wil17],

structures diffractives pour la compression et la combinaison de faisceaux impulsionsnels (projet ITN H2020 GREAT) [Gal20, Ste21] .

### Procédés laser

Le développement de procédés lasers innovants est également un sujet en fort développement dans le cadre des activités sur l'interaction laser matière. Les compétences sont mises à profit pour structurer ou modifier les propriétés optiques de verres et de couches minces [Dou17, Oha17, Rad19]. Une de ces activités lancées récemment est liée à la nanostructuration de couches minces optiques afin de fabriquer des composants photoniques. De nouveaux moyens dédiés à la nanostructuration et la nanoinscription en utilisant des impulsions laser ultracourtes pour mettre en œuvre des processus de « super résolution » ont ainsi été introduits au laboratoire [Moi18].



**Figure T2-5** : Système d'impression 3D laser rapide.

Dans ce cadre, la réponse optique non linéaire des couches minces de  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  a été étudiée en régime femtoseconde à 1030 nm et 515 nm. Une absorption saturable très significative a été obtenue dans le visible et IR, révélant le caractère large bande de ce matériau [Moi 20]. Cette réponse non linéaire est rendue possible grâce au caractère isolant topologique du  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ . Il a été constaté que la réponse optique non linéaire dépend fortement de l'épaisseur des couches minces de chalcogénure. Dans le cadre d'un projet ANR JCJC (SURSTRUCTUR) une étude approfondie a été menée afin de trouver la liaison entre la réponse optique non linéaire et l'épaisseur/ structure cristalline des couches minces optiques. Grâce à cette étude une absorption saturable géante a été obtenue qui est parmi les meilleures réponses reportées dans la littérature [Ver20]. La possibilité d'utiliser ces couches minces pour obtenir une super-résolution est actuellement étudiée.

Une autre partie des travaux se fait dans un cadre collaboratif avec le CEA de Cadarache ayant abouti à une chaire CEA/ECM portée par un enseignant / chercheur du laboratoire : chaire MATLASE sur l'étude et la caractérisation des propriétés de MATériaux à haute température par l'utilisation de technologies LASER. Les travaux relatifs à cette thématique ont porté lors de la période sur la tenue au flux thermique de matériaux métalliques, de céramiques de verres destinés à des applications nucléaires [Hod17, Kar21, Min21, Cif21, Dou21, Rey21, Ric21, Vid20], mise en œuvre grâce à des techniques optiques originales [Gal18, Gal21, Min21, Vid20]

Par ailleurs on pourra également souligner les retombées en termes de valorisation et de transfert de ces aspects procédés laser : 4 brevets, un projet de maturation à la SATT SE, une thèse CIFRE avec Saint Gobain.

### Référence 1. La production scientifique de l'équipe satisfait à des critères de qualité.

Sur la période 2016-2021, la production scientifique s'élève à 234 publications dans des revues internationales à comité de lecture (RICL), ce qui équivaut en moyenne à 39 RICL par an et 2.4 RICL/ETP/an. Outre le nombre de publications, on pourra noter un effort pour publier dans les revues de plus fort facteur d'impact. Ainsi sur la période, 27 articles ont été publiés dans des revues de facteur d'impact supérieur à 10 (en moyenne, un article dans une revue de très haut impact tous les 3 mois). Comme le montrent les éléments de faits marquants sélectionnés dans le portfolio, nous apportons une contribution significative à la connaissance avec des approches originales en nanophotonique et composants.

Les revues où nous publions principalement sont (les chiffres entre parenthèses indiquent le nombre total de publications dans ce journal au cours de la période) : Optics Express (18), Optics Letters (14), Applied Optics (12), ACS Photonics (9), Journal of Applied Physics (8), Nano Letters (8), Scientific Reports (8), ACS Nano (7)... Sur l'ensemble de nos publications, le facteur d'impact moyen est de 4.9 tandis que le facteur d'impact médian est de 3,8 (la moitié de nos publications se classent dans des revues de facteur d'impact supérieur à 3,8). Plus de 80% de notre production d'articles scientifiques (193 publications sur 234) a lieu dans des revues avec un facteur d'impact supérieur à 2, ce qui souligne nos efforts continus pour garantir la meilleure visibilité et qualité de support pour nos résultats. Les membres du laboratoire, y compris les doctorants, sont sensibilisés au danger des revues prédatrices et aux bonnes pratiques de publications scientifiques.

Plus de 80 publications sur 235, soit environ le tiers de notre production, est co-signée avec des partenaires internationaux, dont l'université de Rochester (USA), ICFO (Espagne), ITMO (Russie), université de Sydney (Australie), Argonne national laboratory (USA), KIT (Allemagne)...

## Référence 2. La production scientifique est proportionnée au potentiel de recherche de l'équipe et répartie entre ses personnels.

Avec une production moyenne de 2.4 RICL/ETP/an, notre production est soutenue. Nous veillons collectivement à assurer la meilleure qualité scientifique, avec notamment plus de 50% de nos publications paraissant dans des revues de facteur d'impact supérieur à 3.8 ce qui est d'un excellent niveau dans le domaine de l'optique.

Tous les chercheurs et enseignants-chercheurs affiliés au thème ont contribué à la production scientifique du thème au travers d'au moins une publication sur la période 2016-2021. S'il existe bien sûr des disparités entre les différents chercheurs et enseignants-chercheurs, il convient de garder à l'esprit que les domaines d'activité scientifique du thème sont également très variés, allant de la recherche fondamentale à des travaux très appliqués. Le taux de production et les revues visées sont également différents suivant la thématique. Pour les chercheurs et enseignants-chercheurs rencontrant des difficultés financières passagères les impactant dans leurs travaux, des fonds de soutien (appel à projet annuel) et des fonds spécifiques (appel au fil de l'eau) sont disponibles au laboratoire, ce qui souligne nos efforts collectifs.

Sur les 234 publications, 122 (52%) impliquent au moins un doctorant. Parmi les autres publications, 26 (11%) sont signées exclusivement de personnels permanents, le reste (101 publications, 37%) implique au moins un post-doctorant. Ces chiffres montrent que les doctorants et post-doctorants contribuent largement à la production scientifique du thème. Publier au moins un article est d'ailleurs un critère nécessaire pour être autorisé à soutenir une thèse.

### Synthèse de l'autoévaluation

La production scientifique du thème est solide et diversifiée. Nous apportons des efforts continus pour garantir la meilleure qualité et la meilleure visibilité à notre production comme en attestent les différents chiffres. Etant une grosse structure (33 permanents, plus de 50 non-permanents sur la période), des différences de production existent naturellement et reflètent la diversité des métiers et des thématiques scientifiques. Réunir des sensibilités différentes constitue un défi, mais l'émulation collective est une réalité sur la période concernée.

## Thème n° 3 – Information et Photonique

### Prise en compte des recommandations du précédent rapport

**C1.** Le risque majeur identifié, qui est aussi un point fort du thème, est la transversalité qui peut entraîner une dilution thématique et donc l'affaiblissement de l'expertise du thème dans un domaine pointu. Le comité d'experts encourage les membres de ce thème à poursuivre leur très forte activité de publication à destination des meilleures revues internationales en ciblant tout à la fois des revues amont et des revues à visée applicative.

Nous avons poursuivi notre forte activité de publication, avec la publication de 128 RICL et d'une monographie sur la période, soit 21.1 RICL par an, avec des travaux allant de l'amont à l'applicatif. Une attention particulière a également été portée sur la diffusion de nos résultats vers les revues marquantes des domaines de recherche du thème (IEEE, OSA/Optica, APS ...). En particulier, le facteur d'impact médian est de 3.4 sur l'ensemble de nos publications, 17% de nos publications ayant un facteur d'impact supérieur à 5 (voir section D3R1 du thème). On notera que ce bilan quantitatif s'appuie sur des travaux propres aux différents axes du thème ainsi que sur des collaborations au sein du laboratoire, intra-thème, inter-thèmes mais également avec nos partenaires en France et à l'international.

**C2.** L'investissement scientifique fort des membres de ce thème dans des projets à grande valeur ajoutée sur le plan national ne doit pas s'effectuer au détriment de collaborations internationales. Nous avons cherché à renforcer nos collaborations internationales, avec en particulier la participation active à de nouveaux projets et consortiums internationaux (consortium LISA sur la détection des ondes gravitationnelles, consortium Orion-B en astrophysique/traitement des données) et la coordination de réseaux européens (projets H2020 ITN et COST H2020). Au niveau des publications, cette volonté s'est traduite par une augmentation sensible du nombre de publications effectuées en collaboration avec des laboratoires étrangers, puisqu'environ 1/3 de nos publications RICL comportent maintenant au moins un des auteurs appartenant à un laboratoire étranger.

**C3.** Une forte activité contractuelle pourrait orienter la recherche du thème. Il faut trouver le juste équilibre entre recherche académique amont et appliquée en adéquation avec les besoins des partenaires industriels. Au

cours de ce quadriennal, nous avons veillé à maintenir un équilibre entre nos activités de recherche académiques amont et appliquées. En particulier, les différents concepts, méthodes et outils originaux développés au cours de ce quadriennal ont permis de mener de nombreux projets, soit en collaboration avec d'autres thèmes de l'institut Fresnel, soit avec des acteurs socio-économiques nationaux et internationaux (voir section D4R2 du thème).

**C5.** À la suite du passage en ZRR de l'unité il a été constaté une diminution du flux entrant de doctorants et postdoctorants étrangers. Les membres du thème se sont fortement impliqués dans différentes filières de formation, principalement à l'Ecole Centrale Marseille et dans le master Traitement du Signal et des Images d'AMU. De plus, malgré les difficultés rencontrées (ZRR, covid, ...), nous avons pu faire notablement remonter le flux de doctorants et de post-doctorants, avec 25 doctorants et 19 post-doctorants recrutés sur la période, contre 14 doctorants et 7 post-doctorants sur le quadriennal précédent.

**C6.** Les coordinateurs du thème doivent rester sensibles aux interactions entre les quatre sous-thèmes, notamment entre l'activité « Télécommunications et traitement d'antenne » et les trois autres. Afin que l'augmentation des collaborations pluridisciplinaires avec les autres thèmes reste une force les membres du thème devront veiller à conserver une présence dans la communauté, à travers la participation à divers groupes de travail, GdR, conférences et revues dans leur domaine d'expertise. Nous avons à la fois veillé à augmenter les collaborations scientifiques avec différents acteurs de nos communautés nationales et internationales, mais également à travers la participation et l'animation de groupes de travail, de GdR et de conférences centrées sur nos domaines d'expertise. Enfin, l'activité sur le Lifi qui était naissante au quadriennal précédent a su trouver sa place au sein de la communauté, tant du point de vue de son rayonnement que de sa participation active à la coordination de réseaux scientifiques à l'échelle européenne. De plus, la maturité acquise sur les thématiques de recherches autorise désormais une mise en œuvre plus concrète des collaborations au sein du thème. A titre d'exemple, on peut citer les travaux récents sur les réseaux corporels médicaux qui marient les expertises en télécommunications avec celles dans le domaine de la santé.

En parallèle, afin de dynamiser les discussions scientifiques et les collaborations au sein du thème, nous avons mis en place des séminaires de thème, initialement un par mois en début de quadriennal avant le début de la pandémie. Notre objectif est maintenant de revenir à ce rythme. Au vu de l'émergence au cours de ce quadriennal de différents travaux portant sur l'apprentissage profond, nous avons également lancé un groupe de réflexion – transverse sur les 4 thèmes de l'institut Fresnel – sur l'intelligence artificielle.

## Description des activités de recherche du thème 3 – Information et Photonique.

### Introduction

La notion d'information et les enjeux qui en découlent eu égard au domaine des ondes en général et à la photonique en particulier constituent la clé de voûte de ce thème. Les objectifs s'inscrivent dans un contexte de défis sociétaux relevant principalement du développement de l'internet des objets, de la communication optique, de l'imagerie pour le médical et la biologie, de la télédétection, de la biométrie, du spatial, des ondes gravitationnelles, de l'agriculture de précision.

Des outils théoriques, numériques et expérimentaux sont développés pour l'extraction et le traitement de l'information pertinente à partir des signaux mesurés (optiques, mais également radar, THz, thermiques) ainsi que pour l'analyse de leurs propriétés statistiques ou de la précision de l'information reconstruite. On retrouve ici plusieurs champs d'expertise de l'Institut, comme l'analyse tensorielle des signaux multidimensionnels, le traitement statistique de l'information, l'électromagnétisme des milieux désordonnés, l'instrumentation optique de précision.

Sur la période 2016-2021, le thème Information & Photonique a fédéré 13.1 enseignants-chercheurs/chercheurs, 1.0 ingénieurs (ITA-BIATSS) et 2.0 enseignants/praticiens hospitaliers pour un équivalent temps plein moyen d'environ 10.1 ETP/an en moyenne sur la période. Il a généré 1 monographie, 128 publications dans des revues internationales à comité de lecture (soit plus de 21 publications par an en moyenne) ainsi que 5 brevets et 1 logiciel. Sur la période, 42 doctorants (dont 8 en thèse CIFRE) et 13 post-doctorants ou ATER ont été recrutés. Les activités regroupées ici peuvent se décliner autour de quatre axes :

- Télédétection,
- Traitement de l'information et applications,
- Communications optiques pour l'loT,
- Milieux désordonnés.

Le thème Information & Photonique présente également de forts liens avec les autres thèmes de l'institut Fresnel. C'est en particulier le cas avec le thème Imagerie, avec le développement de nouvelles techniques de traitement des données dédiées à la microscopie ou à l'imagerie médicale. Des liens importants avec le thème Nanophotonique & Composants et le thème Modélisations Electromagnétiques apparaissent également à

travers le développement de nouvelles approches et de nouveaux moyens expérimentaux et métrologiques pour l'étude des milieux désordonnés.

## 1. Télédétection

La télédétection (remote sensing) qui désigne l'ensemble des techniques permettant d'étudier à distance des objets ou des phénomènes est un moyen privilégié pour l'analyse et la surveillance des surfaces continentales et des océans, et fait partie des thématiques de recherche de l'Institut Fresnel depuis de nombreuses années. Les travaux effectués ont permis de relever des défis méthodologiques et applicatifs, tout particulièrement dans le domaine du traitement d'images issues de la télédétection hyperspectrale, permettant d'obtenir en chaque pixel la réponse spectrale des composants d'une scène sur des centaines de bandes.

Nos récents travaux sur le traitement d'images hyperspectrales ont essentiellement porté sur la détection et la classification dans des images aériennes de la surface terrestre. Nous avons mis en évidence l'intérêt, pour en améliorer les performances, de combiner le filtre de Wiener multidimensionnel (fondé sur la décomposition tensorielle) que nous avons précédemment développé, avec des étapes de pré-blanchiment, et de transformée en paquets d'ondelettes tridimensionnelle (3-WPT) sous forme tensorielle afin de réduire le bruit photonique dépendant du signal, point clef de la recherche actuelle dans ce domaine compte tenu de l'évolution des capteurs hyper-spectraux [Del19, Fos18a, Bou18a, Bou18b, Fos17]. Ces dernières années nous avons aussi particulièrement contribué à l'avancée de méthodes de démixage dans ces images en présence de bruit dépendant du signal et de cibles de petites tailles. Des méthodes exploitant les statistiques des vecteurs pixel par bootstrap et/ou par ré-échantillonnage ont été proposées [Rav18]. Nous avons également travaillé sur le développement de nouvelles stratégies d'optimisation dérivées de l'algorithme du Loup Gris, en proposant les méthodes du Loup Gris Discret et du Loup Gris Mixte pour des applications en imagerie hyperspectrale [Mar19] et en classification de données radar en collaboration avec le LEAT [Mar20].

Dans [Liu19], nous avons développé une méthode originale pour la détection des cibles dans des zones ombragées en combinant un réseau de neurones à convolution et le détecteur Adaptive Coherent Estimator de l'image dérivée dans la dimension spectrale. Dans [Sun21a], nous avons développé un nouveau réseau pour pallier les variations spectrales causées par le bruit ou l'environnement, ce qui augmente les variations intra-classes et dégrade les performances des détecteurs. Ainsi, l'autoencodeur de débruitage est introduit pour reconstruire le spectre et augmenter la robustesse spectrale. Un réseau d'autoencodeur de débruitage à plusieurs échelles est créé pour améliorer la détection de cibles. Le spectre d'entrée est codé à différentes échelles pour obtenir un ensemble de représentations d'entrée, qui sont décodées puis fusionnées pour obtenir le spectre final reconstruit. Dans [Liu18, Sun20, Sun21a, Sun21c], nous avons proposé des méthodes non-supervisées pour la classification en imagerie hyperspectrale. Ces méthodes sont basées sur le transfert d'apprentissage et les réseaux adverses génératifs améliorés de Wasserstein pour apprendre les caractéristiques spectrales-spatiales avec une réduction de dimension spectrale.

La télédétection hyperspectrale est également un outil établi pour l'analyse des zones côtières, permettant de déterminer les propriétés de la colonne d'eau, la profondeur et la composition des fonds marins. Dans le cadre du projet ANR-ASTRID HypFom, nous avons ainsi proposé de nouvelles approches d'inversions fondées sur un modèle probabiliste de rétrodiffusion en eau peu profonde intégrant différentes sources de bruits, dues aux capteurs, à la surface rugueuse de l'eau ainsi qu'à la variabilité spectrale associée à chaque classe de fond marin [Jay16, Jay17a]. L'étude menée dans [Cha19] sur la variation de la rétrodiffusion en fonction du fond marin avoisinant une cible et de la turbidité de l'eau, vient confirmer l'importance de prendre en compte les effets d'adjacence dans la colonne d'eau pour réaliser l'inversion. L'estimation de mélanges de matériaux au niveau du fond marin a été résolue [Gui20] en proposant un modèle de mélange et une méthode de démixage adaptés aux effets d'adjacence. Par ailleurs, une analyse fondée sur les bornes de Cramer-Rao a été proposée [Jay18] afin de caractériser les performances d'estimation des méthodes d'inversion en fonction des caractéristiques du milieu marin (turbidité, profondeur, ...) et de celles du capteur. L'étude des performances d'un futur capteur pour l'inversion des produits marins a été réalisée [Min21a, Min21b], en collaboration avec le LIS.

Nous avons également poursuivi nos études de performances du système Radar à Synthèse d'Ouverture polarimétrique et interférométrique (PolInSAR) en collaboration avec l'ONERA. Ce système sera utilisé pour l'estimation de la biomasse à l'échelle planétaire grâce à un satellite dont le lancement par l'agence spatiale européenne est prévu en 2022. Pour cette technique, l'une des difficultés est la présence d'une décorrélation temporelle qui introduit un biais dans l'estimation de la biomasse. En nous basant sur la borne de Cramer Rao, nous avons montré dans [Spo18] qu'avec 3 passages successifs du satellite, il est possible de prendre en compte une décorrélation temporelle simple de manière à ne plus avoir de biais.

En 2018, nous avons rejoint un consortium international d'astrophysiciens et de spécialistes en apprentissage statistique (<https://www.iram.fr/~pety/ORION-B/>) afin de nous intéresser à de récentes observations millimétriques réalisées sur le télescope de 30 m de diamètre, l'IRAM, dont la gamme de fréquences, entre 86 et 116 GHz, permet de caractériser la formation des étoiles dans le milieu interstellaire. En se fondant sur des modèles physico-chimiques complexes, nous avons cherché les meilleurs traceurs de la fraction d'ionisation du

gaz en choisissant comme critère le pouvoir prédictif d'un algorithme de « random forest » [Bro21]. En complétant les données de l'IRAM avec des données du satellite Herschel, nous avons identifié que  $^{13}\text{CO}$ ,  $^{12}\text{CO}$ ,  $\text{C}^{18}\text{O}$  et  $\text{HCO}^+$  sont les espèces les plus importantes pour retrouver la densité de colonne de  $\text{H}_2$  [Gra21]. Enfin, nous avons caractérisé la précision d'estimation pour un modèle radiatif à l'équilibre thermodynamique local. En plus de renforcer la confiance dans les estimations acquises, cette étude a contribué à prédire les nouvelles observations nécessaires à l'obtention d'estimations précises dans les zones où la précision n'est pas encore suffisante, et a permis d'identifier les biais induits par les hypothèses simplificatrices utilisées habituellement dans l'analyse de telles observations [Rou21].

## 2. Traitement de l'information et applications

Cet axe regroupe différents travaux en traitement du signal ou de l'image et plus généralement en traitement de l'information. Par ailleurs, ces travaux présentent souvent de forts liens avec les autres axes de ce thème ainsi qu'avec le thème « imagerie ».

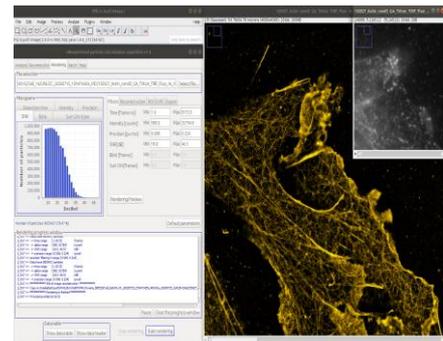
Parmi les domaines applicatifs abordés, l'imagerie médicale et l'imagerie pour la biologie ont constitué un axe de recherche important.

En collaboration avec le Centre Européen de Recherche en Imagerie Médicale (CERIMED), nous nous sommes intéressés à la problématique de l'aide à la classification assistée par ordinateur dans le cas de maladies neurodégénératives, sur la base d'images de Tomographie par Emission de Positrons (TEP). A cet effet nous avons développé de nouvelles méthodes de représentation, d'extraction et de sélection d'attributs pertinents, en vue d'une classification, sur la base d'une approche multi-échelle [Pan19a, Pan19b, Gar18]. Il nous a été ainsi possible de quantifier la pertinence de certains attributs et d'améliorer par la même occasion le taux de bonne classification des images issues de sujets atteints de la maladie d'Alzheimer de celles provenant de sujets sains. Tout récemment, nous nous sommes également intéressés aux méthodes issues de l'apprentissage automatique. Nous avons ainsi développé une méthode de classification semi-supervisée de données, basée sur le renforcement de la qualité des données médicales par des techniques de graphe de voisinage [Bec17, Bec19]. Parallèlement à ces activités, nous portons un intérêt particulier aux méthodes à base de réseaux de neurones profonds à des fins de débruitage, de segmentation et de classification dans l'objectif d'un développement de méthodes d'aide au diagnostic assisté par ordinateur, avec en particulier le développement d'une approche pyramidale multi-coups 2D [Pan21] de meilleure performance que les approches 3D existantes pour le diagnostic de la maladie d'Alzheimer en imagerie TEP.

Nous avons également travaillé sur les signaux d'électroencéphalogramme (EEG), et nous avons proposé une méthode [Rid17] pour caractériser, identifier et classifier certains signaux EEG pathologiques. Cette méthode est essentiellement basée sur des distributions temps-fréquences temporelles pour analyser la non-stationnarité, l'objectif étant de détecter les crises maximales et de faire la distinction entre les signaux EEG normaux et pathologiques. Nous avons alors montré l'efficacité de cette méthode sur des signaux EEG réels. Dans [Rid20], nous avons proposé une méthode utilisant le machine learning pour la classification des signaux EEG.

Différents travaux ont été conduits sur les méthodes statistiques appliquées à l'imagerie Raman comprimée en relation avec le thème « imagerie ». Cette technique consiste à mesurer, non plus le spectre entier, mais les nombres de photons détectés dans des sommes de bandes spectrales. Cela revient à filtrer optiquement les spectres avec des filtres binaires, c'est-à-dire dont les coefficients pour chaque bande spectrale sont soit égaux à 1 soit égaux à 0. Les techniques développées dans la littérature étaient fondées sur des approches empiriques (estimation des moindres carrés des coefficients de mélange de spectre et classification des espèces présentes dans l'échantillon analysé à l'aide d'un classifieur quadratique). Nos travaux sur ce sujet ont permis de caractériser précisément les performances de la technique « Raman comprimée » que ce soit pour l'estimation de coefficients de mélange [Réf18] ou pour la classification d'espèces [Réf19a]. Il a ainsi pu être montré que de très faibles erreurs peuvent être obtenues avec très peu de photons détectés. Les paramètres essentiels qui caractérisent la difficulté de la tâche à accomplir ont été obtenus en analysant les bornes de Cramer-Rao et de Bhattacharyya. Ces études ont également conduit [Réf19b] à définir un nouveau protocole de mesures qui permet de réaliser les classifications avec une erreur maîtrisée et bornée, indépendamment de l'intensité du spectre analysé qui peut être variable dans les échantillons étudiés. Cette approche permet également d'utiliser un nombre de filtres binaires inférieur au nombre de classes à discriminer, ce qui n'était pas le cas avec les techniques développées auparavant.

Nous avons également poursuivi nos travaux en microscopie optique super-résolue STORM (Stochastic Optical Reconstruction Microscopy). Nous avons montré [Mai18] à l'aide d'une étude fondée sur la borne de Cramer-Rao, qu'il n'était pas possible pour un algorithme de reconstruction de la position des particules d'avoir des performances satisfaisantes à des densités de particules par image supérieures à 2 particules par micron carré et des rapports signaux à bruits inférieurs à 40dB. Nous avons alors proposé un algorithme conçu pour la haute densité de particules, sans paramètre à régler, rapide et permettant d'estimer non seulement la position et l'intensité des particules, mais également l'ordre de grandeurs des erreurs de positionnement en fonction de la densité de particules. Nous avons pu étendre ces approches dans le domaine des rayons X (XR-UNLOC). Nous avons ainsi montré qu'il était possible de reconstruire, sans biais, la position des particules jusqu'à des tailles de PSF de l'ordre de 0.3 pixels mais également de corriger des artefacts de reconstruction dans les cas encore plus difficiles avec des PSF de seulement de 0.1 pixels [All21].



**Figure T3-1** : Logiciel UNLOC (UNsupervised particule LOCalization) pour la microscopie optique super-résolue en haute densité de particules (licence gratuite pour un usage universitaire).

Dans le cadre d'applications à la biométrie, nous avons poursuivi au cours de ces dernières années nos travaux sur la reconnaissance faciale basée sur une modélisation tensorielle ou multidimensionnelle. Après avoir établi une nouvelle modélisation tridimensionnelle, de nouveaux algorithmes basés sur l'algèbre multilinéaire, permettant d'exploiter simultanément toutes les informations extraites de la séquence d'images ont été développés [Cho16, Cho17, Oua17, Bes19a, Bes19b]. Ces algorithmes permettent une réduction de dimension adaptée et une nouvelle façon de fusionner les descripteurs locaux. Ces travaux ont montré une nette amélioration du taux de bonne reconnaissance. Cette amélioration est observée aussi avec des données acquises dans des conditions expérimentales très difficiles.

Parallèlement, plusieurs travaux ont porté sur le traitement de signaux physiques pour la tomographie. Ainsi, dans [Dan20, Dar19, Dan21a, Dan21b] nous avons développé des techniques pour la reconstruction de la tomographie de la conductivité électrique en proposant des solutions au problème inverse associé. Pour la validation de nos travaux, nous avons mis au point une nouvelle stratégie d'excitations simultanées et orthogonales de tomographie par impédance électrique. Dans [Fos18b], nous avons proposé une solution pour établir une cartographie de la localisation des objets enfouis basée sur une analyse multi-fréquentielle haute résolution couplée avec un algorithme d'association des temps d'arrivée des échos réfléchis sur les objets.

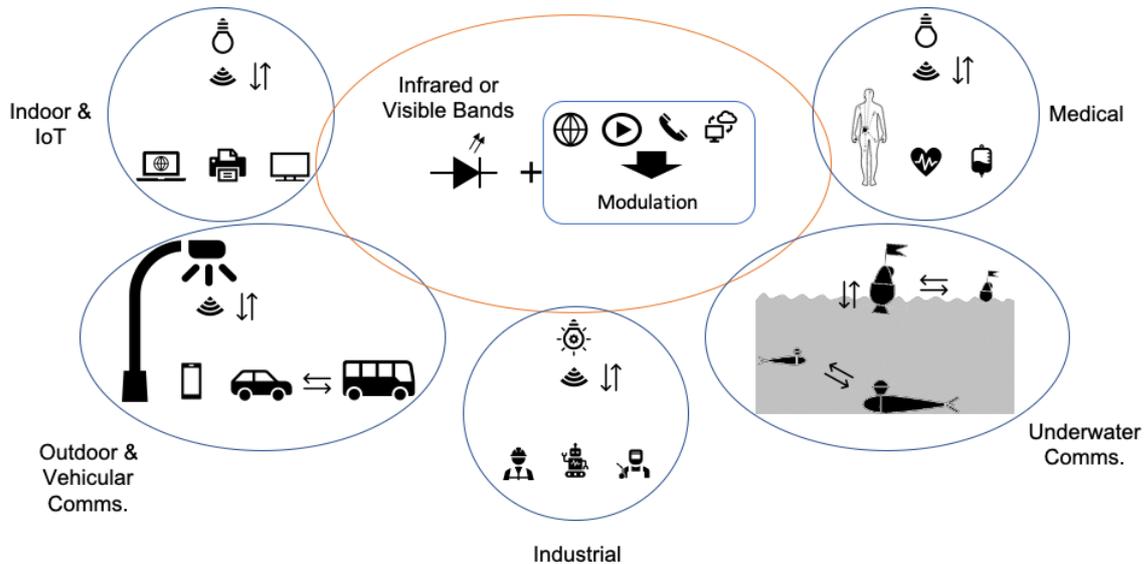
Nous étudions également des problèmes à la frontière entre les statistiques et la géométrie. Notamment, nous nous intéressons à la modélisation de données aléatoires qui ne se représentent pas par des points dans un espace vectoriel. Des densités de probabilités sur les groupes de transformations ont été proposées dans le cas des mouvements rigides [Che20] et dans le cas des matrices de Jones inversibles.

### 3. Communications Optiques pour l'IoT

Un des défis majeurs pour les futurs réseaux de communication sans fil est de répondre à l'immense croissance du trafic de données mobiles et de prendre en charge une gamme diversifiée de services et d'applications. Le nombre croissant d'appareils intelligents connectés, combiné à l'adoption universelle des réseaux sociaux et des applications multimédias avancées ainsi que les nouveaux cas d'usage dans les milieux industriels liés à l'émergence de l'Industrie 4.0, sont les principaux contributeurs à cette croissance.

Ces réseaux doivent prendre en charge les applications et les services émergents en lien avec la notion de l'Internet des objets (IoT, Internet of Things), tels que pour les villes intelligentes (smart city), les maisons intelligentes (smart home), les usines intelligentes (smart factory), la télésurveillance médicale (smart healthcare), etc. Ces applications nécessitent une fiabilité et une sécurité élevées, une faible latence, et une faible consommation d'énergie, et doivent pouvoir gérer potentiellement une grande densité de terminaux. Avec l'épuisement des ressources spectrales radiofréquence (RF), les communications optiques sont vues aujourd'hui comme une technologie complémentaire, voire alternative dans certaines applications, pour les futurs réseaux de communication. Dans ce contexte, nos recherches ont particulièrement porté sur l'utilisation de la technologie d'optique sans-fil dans les trois volets de communications optiques aériennes (FSO, Free-Space Optics), les communications optiques dans le spectre visible (VLC, Visible-Light Communications), et les communications optiques sous-marines (UWOC, Underwater Wireless Optical Communications). Notre contribution a globalement consisté à améliorer les performances et la fiabilité de ces liaisons face aux effets indésirables du milieu de propagation, la bande passante limitée des composants optoélectroniques, et la mobilité des terminaux. La plupart de ces travaux ont été réalisés avec une forte collaboration internationale et avec les industries du secteur. En particulier, on peut citer un projet H2020 ITN sur la technologie VLC et un projet de collaboration avec le Canada sur la technologie UWOC. Le prix "IEEE Communications Society (COMSOC) Best

Survey Paper Award" a également été attribué en 2019 pour l'article "Survey on Free Space Optical Communication : A Communication Theory" publié en 2014 par M. A. Khalighi et M. Uysal dans la revue "IEEE Communications Surveys & Tutorials".



**Figure T3-2 :** Communications Optiques pour l'IoT.

Nos travaux sur les systèmes FSO ont notamment porté sur la modélisation du canal et l'étude des performances des réseaux FSO coopératifs en utilisant des relais tout-optique (sans conversion optique-électronique et électronique-optique) qui représente une solution à faible coût, mais aussi à faible latence, pour assurer des liaisons de longue portée en contournant les obstacles et/ou en réduisant l'effet des turbulences atmosphériques [Nor17, Nor19]. Nous avons aussi étendu ces recherches aux réseaux coopératifs hybrides RF/FSO avec la particularité de transfert sans-fil d'énergie [Asg19]. Un autre sujet de recherche a consisté à étudier la modélisation du canal et l'optimisation des paramètres de l'émetteur-récepteur pour les liaisons FSO utilisant des drones comme relais [Dab18], qui est une approche prometteuse pour assurer la couverture pour les liaisons temporaires dans les réseaux 5G, par exemple. D'autre part, pour tenir compte des erreurs de pointage de faisceaux laser, nous avons proposé une solution efficace d'estimation de canal optique sans-fil à complexité raisonnable [Dab17]. Un autre volet de nos travaux a consisté en l'étude de l'efficacité de la technique de transmission en mode différentiel (en utilisant deux faisceaux laser) dans différentes conditions de propagation et en utilisant différents schémas de modulation et modes de photo-détection [Aba17, Aba18, Dab19b]. Enfin, nous avons travaillé sur les techniques de détection efficaces et à complexité réduite pour les plateformes à forte mobilité sujettes à de fortes erreurs de synchronisation [Dab19a].

Quant aux systèmes VLC, nous avons, en particulier, travaillé sur la modélisation et la caractérisation du canal optique et les techniques de modulation à forte efficacité spectrale permettant un débit de transmission élevé avec une complexité d'implémentation raisonnable [Kha17a, Elt19]. Ces recherches ont monté en puissance après le démarrage du projet H2020 MSCA ITN VisIoN. Nous avons alors étendu nos travaux à l'utilisation de la technologie VLC pour les applications liées à l'IoT dans différents contextes de « smart-city », « smart-home », et « smart-healthcare ». En particulier, dans un contexte smart-home, nous avons proposé des solutions efficaces d'accès multiples pour les réseaux LiFi cellulaires [Elt20a]. Un nouveau schéma hybride de pré-codage/NOMA (accès multiple non-orthogonal, Non-Orthogonal Multiple-Access) a été proposé, entre autres, permettant de gérer un nombre relativement grand d'utilisateurs, y compris se trouvant au bord des cellules. Afin de permettre une adaptation aux variations de l'intensité lumineuse, nous avons proposé une solution de transmission basée sur la planification temporelle et la coordination des transmissions au sein de chaque cellule [Elt20b]. Aussi, pour gérer la mobilité des utilisateurs, de nouvelles techniques de « handover » ont été proposées permettant des connexions à haut débit et fiables. Enfin, nous avons travaillé sur l'optimisation des paramètres de l'émetteur et du récepteur pour améliorer les performances des réseaux VLC en utilisant une approche bio-inspirée basée sur l'optimisation par essaims particulaires [Elt21a, Elt21b]. Un autre volet de cet axe de recherche a consisté en l'étude de caractérisation du canal optique pour les réseaux corporels (WBAN, Wireless Body-Area Networks) avec les connexions VLC ou infra-rouge dans un contexte hospitalier. Deux types de connexions ont été étudiées : les liens intra-WBAN entre les capteurs médicaux et un « hub » (sur le corps du patient), et les liens extra-WBAN entre un « hub » et un point d'accès (dans une chambre d'hôpital par exemple). Une modélisation précise du canal intra-WBAN a d'abord été faite où la nouveauté consistait à prendre en compte les mobilités locale et globale [Had20]. Nous avons ensuite également étudié les techniques de transmission d'accès multiples à faible complexité d'implémentation pour assurer les transmissions simultanées de capteurs/utilisateurs pour les liens intra/extra-WBAN. Pour les premiers, nous avons privilégié un traitement dans

les couches supérieures de transmission, tandis que pour les liaisons extra-WBAN, nous avons proposé des solutions d'accès multiples dans la couche physique [Has20]. L'ensemble de ces travaux ont été réalisés dans un contexte de collaboration internationale, notamment en lien avec les partenaires académiques et industriels du projet ITN VisIoN.

Enfin, pour les systèmes UWOC, nous nous sommes concentrés dans un premier temps sur l'étude de l'impact du bruit solaire sur les performances des liaisons dans les eaux peu profondes, le développement des codes correcteurs d'erreurs efficaces [Mat18] et l'utilisation des photomultiplicateurs à base de Silicium (SiPM) pour augmenter la portée en prenant en compte les aspects de complexité d'implémentation [Kha17b, Kha20]. Ces composants s'avèrent, en effet, très prometteurs pour la mise en place des réseaux IoT sous-marins avec des fortes contraintes sur le débit de transmission et la consommation énergétique. Nos recherches ont ensuite porté sur le développement de schémas de transmission appropriés pour ces composants. En particulier, pour tenir compte à la fois de la bande passante et de la dynamique limitées des SiPM, des solutions de transmission ont été proposées, basées sur l'égalisation du canal dans le domaine fréquentiel [Kha20], ou sur les transmissions multi-porteuses [Ess20]. Une activité de recherche intense est également menée sur l'impact des erreurs d'alignement (pointage) du faisceau sur les performances des liens UWOC, ainsi que la conception des solutions de transmission robustes aux erreurs de pointage [Gha21a, lje21]. Enfin, dans la perspective d'un réseau IoT sous-marin, nous avons étudié la modélisation du canal et les performances du réseau pour un essaim de drones sous-marins communiquant entre eux avec des liens UWOC en mode diffus, sous une couche de glace à la surface de la mer [Gha21b]. Cette dernière a été la première étude de ce genre et ouvrirait des perspectives intéressantes dans diverses applications. Tous ces travaux ont été réalisés avec une forte collaboration internationale avec l'Université McMaster du Canada ainsi qu'avec l'IFREMER.

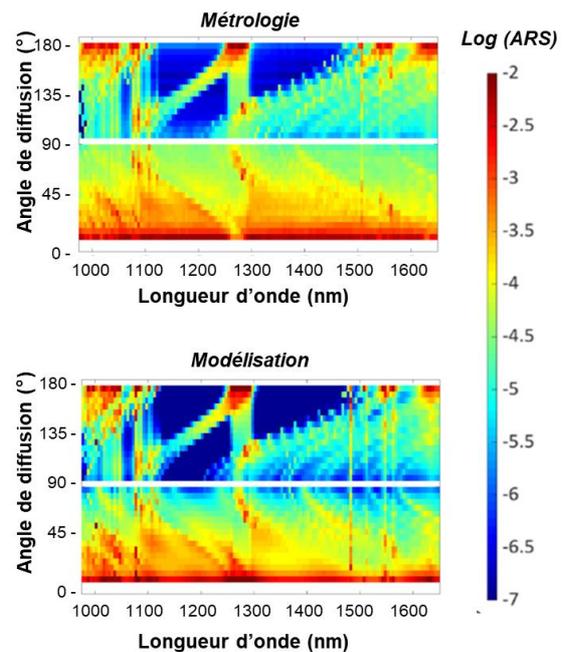
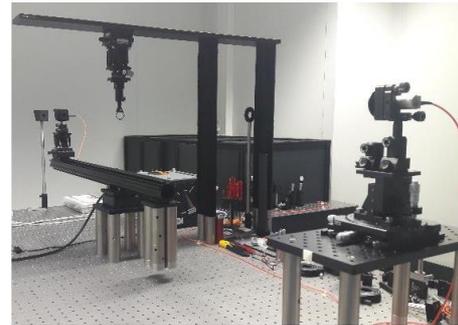
Dans l'ensemble, ces recherches concernent un spectre relativement large d'applications, avec un accent particulier sur les aspects de traitement du signal et de transmission de l'information. Ces activités, pour la plupart pluridisciplinaires, ont été valorisées dans le cadre d'études avec des partenaires académiques et industriels nationaux et internationaux. Aussi, dans le cadre de nos collaborations internationales, une partie de ces travaux a été accompagnée par des études expérimentales avec des maquettes de laboratoire pour évaluer l'efficacité des solutions étudiées.

#### 4. Milieux désordonnés

La notion de désordre et les études associées se déclinent sous différents aspects tels que les propriétés de désordre caractéristique de l'onde elle-même (cohérence, polarisation) ou caractéristique des milieux hétérogènes sondés. Les outils développés, théoriques, numériques et instrumentaux, analysent la question du désordre via des approches complémentaires et dans différentes fenêtres spectrales. Les applications concernent l'agriculture de précision, le spatial, l'astronomie classique ou gravitationnelle, les télécommunications optiques, le biomédical... Les interactions sont fortes avec les thèmes Nanophotonique & Composants et Imagerie, et s'appuient également sur des expertises relevant du thème Modélisations électromagnétiques.

Ainsi, les études portant sur la polarisation et la cohérence ont permis d'optimiser les techniques d'imagerie polarimétrique active par des techniques de brisures d'orthogonalité [Ort16, Ort17, Par19], de proposer une méthode simple et efficace pour mesurer la matrice de cohérence d'un champ vectoriel en utilisant la diffraction à partir d'une ouverture et d'un petit obstacle complémentaire [Alo18], et de développer des techniques de synthèse de composants multicouches permettant de dépolariser la lumière de façon contrôlée [Ail18]. Ces travaux ont également permis de proposer une analogie entre l'analyse de la polarisation et l'intrication quantique via une description des inégalités qui s'appliquent aux mesures de corrélations dans des champs multi-composants [Qia18].

Le cas des milieux faiblement désordonnés (optique de précision) est étroitement lié à l'optimisation des filtres multicouches interférentiels. Les pertes optiques de ces composants sont essentiellement dues à la diffusion lumineuse induite par les rugosités de surface et hétérogénéités de volumes, éléments par nature désordonnés qui augmentent de façon exponentielle la complexité des diagrammes de diffusion avec le nombre de couches minces. Les théories et codes de calcul développés par l'Institut permettent désormais de prédire les lobes de diffusion spectraux et angulaires d'empilements complexes ( $\approx 1000$  couches). Leur développement a fait l'objet d'une monographie de 370 pages distribuée à l'international [Amr2021] par Cambridge Press University. Les résultats obtenus ont mis en exergue la nécessité d'une métrologie présentant des performances supérieures de plusieurs décades à celles des meilleurs instruments actuels, de façon continue sur l'ensemble des bandes visible et proche infra-rouge. Le diffusomètre SALSA (Spectral and Angular Light Scattering characterization Apparatus) a été conçu dans ce contexte avec le soutien du CNES et de l'AID, et répond à cette problématique. Il constitue désormais l'état de l'art international [Von19] de la métrologie de la lumière diffuse [Zer17, Leq18, Fou20]. Ainsi, S. Liukaityte dont la thèse a été dédiée au développement de SALSA dans le visible a obtenu le prix de thèse de l'école doctorale Sciences de la Matière ainsi que le prix de thèse d'Aix Marseille Université. L'accord avec les modèles est par ailleurs excellent [Zer17, Leq18]. La confiance ainsi obtenue dans les modèles électromagnétiques a rendu possible la première implémentation de réseaux de neurones pour répondre au problème inverse de l'optimisation des pertes par diffusion lumineuse de structures multicouches [Fou21]. De nouveaux concepts de diffusomètres originaux ont été déposés. Ils permettent désormais une mesure « blanche » instantanée à 1 angle [Amr18], ainsi que la métrologie des lumières rétrodiffusée et rétrofléchie avec un niveau de détectivité unique au monde [Kha21b]. L'ensemble de ces résultats a permis à l'Institut d'être sollicité pour représenter la France dans les comités ISO dédiés à la normalisation, à l'échelle internationale, de la métrologie de la lumière diffuse. L'IF a par ailleurs intégré le consortium du grand projet LISA à la demande de la communauté des ondes gravitationnelles et après validation par l'ESA, pour y prendre en charge la modélisation et la métrologie des pertes par diffusion lumineuse au niveau des composants. L'intégration du consortium Virgo est en cours pour la prise en main des mêmes aspects.



**Figure T3-3 :** Instrument SALSA et nappes de diffusion calculées et mesurées sur un filtre complexe ( $> 100$  couches)

Ces travaux relatifs aux surfaces optiques ont été étendus au cas des milieux fortement désordonnés (à signature optique quasi-lambertienne), tout d'abord pour la modélisation exacte (par intégrales de frontière) de la diffusion par des revêtements multicouches déposés sur des surfaces arbitrairement rugueuses [Sor19, Sor20], et notamment pour des applications de type « absorbeurs de lumière achromatiques ». A ce stade, on peut noter également que si les surfaces sont en général analysées via leur décomposition dans l'espace de Fourier [Amr18], une proposition alternative de base de fonctions dont les propriétés interpolent entre celles de Fourier et les expansions polynomiales a été étudiée [Lia19]. Les volumes diffusants sont également considérés ; la complexité inhérente au désordre qui les caractérise rend les outils statistiques particulièrement adaptés à leur étude en intensité, comme en polarisation où ils permettent d'identifier les signatures optiques de végétaux [Her19]. Par ailleurs, l'extension des échelles d'analyse au régime Téra-Hertz [Pou18], couplée à la maîtrise des outils analytiques d'analyse de systèmes multicouches [Amr21], a conduit au développement d'une technique permettant d'extraire de la mesure temporelle (ps) d'une impulsion TeraHertz la structure fine interne des feuilles de végétaux [Aba20]. Ces dernières révèlent en effet une structure à 8 couches d'épaisseurs sub longueur d'onde en régime TéraHertz, offrant ainsi la possibilité d'étudier l'effet du stress hydrique. Enfin, nos études ont également permis qu'émerge une activité sur le rayonnement thermique photo-induit dans les systèmes interférentiels, aujourd'hui financée par le CNES et ArianeGroup. En appui sur les processus de fluctuation/dissipation, ces travaux donnent accès, pour un système multicouche donné soumis à un éclairage continu, pulsé ou cadencé, aux variations temporelles, spectrales et angulaires du rayonnement. Il est également possible de confiner ce rayonnement dans certaines fenêtres angulaires ou spectrales.

D'un point de vue global, l'activité internationale autour des milieux désordonnés représente, sur la période, une quinzaine de contrats de recherches et de prestations octroyés par une dizaine d'agences et d'industriels, ainsi que le recrutement de 10 CDDs.

### Référence 1. La production scientifique de l'équipe satisfait à des critères de qualité.

Sur la période 2016-2021, la production scientifique pour le thème Information & Photonique s'élève à 1 monographie et 128 publications dans des revues internationales à comité de lecture (RICL), soit en moyenne plus de 21 RICL par an et 2.1 RICL/ETP/an. Le thème publie dans des journaux phares des domaines (IEEE, OSA/Optica, APS ...), avec des travaux amonts et des travaux plus applicatifs.

Il est à noter que nous avons veillé à publier dans des revues marquantes des différents domaines de recherche du thème, puisque le facteur d'impact médian est de 3.4 sur l'ensemble de nos publications. De plus, plus de 70% de nos publications ont été faites dans des revues avec un facteur d'impact supérieur à 2, et 17% (soit 22 publications) dans des revues avec un facteur d'impact supérieur à 5. Nous avons également été sollicités pour 22 conférences invitées internationales sur la période, soit en moyenne 2 par ETP.

### Référence 2. La production scientifique est proportionnée au potentiel de recherche de l'équipe et répartie entre ses personnels.

La production scientifique au sein de notre thème s'élève à 2.1 RICL/ETP/an. De plus, l'ensemble des chercheurs et enseignants-chercheurs du thème ont contribué à la production scientifique du thème et plus généralement de l'Institut Fresnel.

Sur les 128 publications RICL du thème, 48 impliquent au moins un doctorant, soit 37% des publications. Précisons également que tous nos doctorants doivent avoir au moins une publication RICL pour soutenir leur thèse. Enfin les post-doctorants du thème sont co-auteurs en moyenne de plus d'une publication par an sur la durée de leur contrat de travail.

## Synthèse de l'autoévaluation

Durant ce quadriennal, nous avons suivi les recommandations issues de notre précédente évaluation. En particulier, nous avons poursuivi nos efforts pour maintenir notre forte activité de publication, avec 1 monographie et 128 RICL sur la période, soit 21.1 RICL par an, avec des travaux allant de l'amont à l'applicatif (TRL 1 à TRL 5/6 ou de l'idée au prototype).

Au cours de ce quadriennal, un accent particulier a été mis sur l'expansion et la pérennisation des collaborations internationales du thème afin d'en augmenter la visibilité. L'intégration au consortium LISA et à la communauté des ondes gravitationnelles (plus d'un millier de chercheurs sur 3 continents) ainsi que la coordination de 2 projets H2020 sont des faits marquants de la période qui illustrent le gain en visibilité et la reconnaissance à l'international de l'expertise du thème Information et Photonique de l'Institut Fresnel.

Par ailleurs, si le bilan du thème est excellent, le principal risque sur les prochaines années est le départ à la retraite imminent de plusieurs de ses acteurs majeurs qui pose la question de la pérennisation du savoir-faire et de l'expertise à moyen terme.

Si l'ensemble des personnels a su faire face au grand nombre de difficultés rencontrées en fin de quadriennal en raison de la crise sanitaire internationale, il tarde à tous de pouvoir retrouver un mode de fonctionnement nominal. Cela concerne l'animation scientifique au sein du thème et/ou du groupe de réflexion transverse sur l'intelligence artificielle, mais également l'organisation des enseignements, la grande majorité des personnels permanents impliqués dans ce thème étant enseignant-chercheurs.

## Thème n° 4 – Imagerie

### Prise en compte des recommandations du précédent rapport

**C1. Étant donnée la diversité des projets abordés, les équipes du thème imagerie avancée et vivant devront être vigilantes face au risque d'éparpillement des applications envisagées, afin de conserver le niveau de**

qualité actuel. Cela permettra en particulier d'assurer la pérennité, voire le renforcement des collaborations externes clés, notamment avec les équipes de biologistes/médecins. Le thème Imagerie a renforcé son activité sur les sujets abordés lors du dernier quadriennal. De nombreuses collaborations externes se sont maintenues voire renforcées avec des entreprises (voir Section D4), des hôpitaux (La Timone, Institut Paoli Calmette) ainsi que des laboratoires de recherche académique. Notons que l'arrivée de médecins (équipe IMOTHEP) au sein du thème a pérennisé un certain nombre de collaborations (qui sont devenues « internes »). De même, la venue de biologistes a consolidé une collaboration fructueuse autour de l'étude du cytosquelette, et permis une extension du réseau de collaborateurs à l'échelle nationale et internationale. A titre indicatif, le seul projet sur la microscopie polarisée implique une dizaine de collaborations régulières (Marseille : CIML, IBDM, INT ; Paris : I Curie, IJM, Paris-Saclay Univ., Sorbonne Univ. ; Bordeaux : IINS ; Allemagne : U. Braunschweig ; UK : Univ. Exeter, Univ. Manchester ; USA : U. Brandeis ; Espagne : Univ. Madrid, ICFO).

**C2.** L'attractivité de nouveaux chercheurs ou enseignants-chercheurs a été principalement basée sur des mobilités internes au sein des établissements et non sur des recrutements. Il faudra veiller à optimiser les possibilités de promotion interne pour les membres (AMU, ECM, CNRS) de l'équipe. Sur le dernier quadriennal, plusieurs membres du thème ont été recrutés sur concours (2 recrutements CR CNRS Sections 8 et 54, 1 recrutement MCF ECM, 1 recrutement PR ECM après une Chaire A\*Midex). Plusieurs membres du thème ont été également promus lors du dernier quadriennal (2 CR-DR, 1 MCF-PU, 2 DR2-DR1).

**C3.** Les relations anciennes et diverses avec de nombreux acteurs du monde socio-économique devraient encourager la recherche de financement de thèses de type CIFRE ou industrielles. Les membres du thème entretiennent des relations fortes avec le secteur industriel. Ceci se fait effectivement par l'intermédiaire de thèses CIFRE (4 doctorants accueillis), mais aussi par le biais de contrats susceptibles de financer le recrutement de jeunes chercheurs (voir section D4).

**C5.** Risque d'effet chronophage de la coordination des programmes Europhotonics Erasmus Mundus et Erasmus+. Le programme Europhotonics est une force du laboratoire, coordonné par des ECs qui font vivre ce programme tout en menant une recherche compétitive. Les prises de responsabilité de certains membres du thème (direction de l'I. Fresnel, de la direction de la recherche à ECM) n'ont pas eu d'impact négatif sur leur productivité et dynamisme scientifique. En attestent une production de grande qualité dans les meilleurs journaux (Nature Comm, PNAS, Optica, ...).

**C6.** Risque d'isolement des équipes situées sur un deuxième site distant (locaux du CERIMED). Contexte de recrutement de personnels permanents contraint. Risque d'isolement des chercheurs biologistes récemment mutés dans le contexte de leur progression de carrière, et en interne. Si l'ensemble des travaux du thème trouve naturellement des applications dans l'imagerie du vivant (d'où le nom du thème), des opportunités en optique, acoustique, microélectronique, nanotechnologies existent aussi, qu'il conviendra de ne pas oublier. L'intégration des chercheurs en biologie s'est révélée fructueuse. Leur activité se développe pleinement en synergie avec le laboratoire. Cette nouvelle activité est l'objet de plusieurs financements en biologie, de plusieurs recrutements en CDD (techniciens, étudiants en thèse, postdoc). Grâce au soutien de l'unité et de l'INSIS CNRS, une technicienne en biologie (BAP A) va rejoindre l'I. Fresnel en mobilité interne. Au-delà des recrutements, la biologie se place au cœur de la politique scientifique du thème (L. Le Goff, représentant du thème Imagerie est biologiste), et fait l'objet de plusieurs collaborations intra-thème et inter-thème (imagerie polarisée du cytosquelette ; microscopie adaptative sur tissus ; microscopie super-résolue par illumination aléatoire). Les fortes interactions entre le CERIMED et les thèmes « Information et Photonique » et « Nanophotonique et Composants » impliquent des personnels se déplaçant au CERIMED à plusieurs titres : collaborations IMOTHEP-autres équipes sur l'analyse de l'imagerie moléculaire en médecine nucléaire (TEP) et l'instrumentation pour l'imagerie nucléaire ; recherche au CERIMED en imagerie des tissus, qui s'est récemment renforcée par le recrutement d'un MCF ECM dont l'activité de recherche expérimentale est localisée au CERIMED. De par ses interactions fortes avec les membres du sous-thème « numérique », il renforce les liens entre le CERIMED et le reste du thème ; le responsable du service d'ophtalmologie de l'hôpital de la Timone a enfin rejoint l'équipe DIMABIO au CERIMED pour travailler sur l'application au diagnostic clinique des techniques de tomographie cohérente optique développées sur l'imagerie de la cornée.

## Description des activités de recherche du thème 4 – Imagerie.

Le thème imagerie se caractérise par une diversité très importante dans les contrastes étudiés et des longueurs d'ondes utilisées. Ainsi, des systèmes d'imagerie sont développés des rayons X jusqu'aux hyperfréquences, en passant par les ultrasons et l'optique. Dans ce dernier domaine, l'Institut développe de nombreuses configurations de microscopes, endoscopes et instruments de tomographie, pour être sensible à l'absorption, à l'épaisseur optique, au tenseur de polarisabilité, à la fluorescence à 1 ou 2 photons, au tenseur de susceptibilité non-linéaire, aux signaux photo-acoustiques, ou encore à la permittivité dans des domaines de fréquences variés (micro-ondes, optique). Les systèmes que nous développons reposent sur les compétences que le laboratoire cultive depuis des années, en modélisation, analyse numérique et instrumentation. Le thème Imagerie tient particulièrement à maintenir un lien fort entre développements conceptuels, numériques et instrumentaux, substrat indispensable pour le développement des futurs outils d'imagerie.

Plus récemment, nous avons ouvert un nouveau front de recherche plus spécifiquement axé sur les applications de nos techniques d'imagerie. Ainsi, des travaux sur des problèmes biologiques précis sont maintenant menés à l'Institut Fresnel avec l'arrivée de chercheurs biologistes (2015). Les applications se sont étendues au domaine clinique, pour la détection et le suivi des pathologies, notamment dans le cerveau. En effet, une équipe de médecins travaillant sur l'imagerie nucléaire a rejoint le laboratoire en 2018.

Enfin, le thème imagerie s'implique fortement dans l'ouverture de ses instruments les plus matures, à des communautés variées, académiques et industrielles, dans le domaine de la biologie et du biomédical, jusqu'à des applications cliniques. Ainsi quelques équipements ont été intégrés à la plateforme Photonique labellisée « plateforme technologique Aix Marseille Université » en 2021, auxquels viennent s'ajouter des équipements innovants développés dans le cadre du projet Equipex+ IDEC « imagerie et détection computationnelles ». Au sein du projet IDEC, un nouvel outil pour l'analogie micro-onde sera bientôt ouvert dont les applications s'orientent de manière croissante vers la détection d'objets en astrophysique.

Sur la période 2016-2021, le thème Imagerie a réuni 22.8 enseignants-chercheurs/chercheurs, 9.8 ITA/IATSS et hospitaliers pour un total de 24.4 ETP/an en moyenne sur la période. 273 publications ont été publiées dans des revues internationales à comité de lecture (soit 45.5 publications par an en moyenne) ainsi que 5 brevets. Sur la période, 53 doctorants (dont 4 CIFRE) et 48 post-doctorants ont été recrutés, et 87 stagiaires ont été accueillis.

Le thème imagerie s'articule autour des 4 sous-thèmes suivants :

- Numérique : le développement d'outils numériques pour modéliser et interpréter les données fournies par les imageurs
- Instrumentation : l'implémentation d'instruments générant de nouveaux contrastes d'intérêt pour la compréhension des échantillons sondés
- Biologie : l'étude du vivant, champ d'application de l'imagerie
- Médical : les applications de l'imagerie à la médecine

## 4.1 Numérique

Les briques fondamentales de l'imagerie computationnelle sont la modélisation du lien entre les mesures et l'objet observé, le développement d'algorithmes d'inversion, la co-conception permettant de coupler au mieux l'instrumentation et le traitement des données. A l'Institut Fresnel, ces activités sont menées dans des domaines très divers, des rayons X aux micro-ondes en passant par l'acoustique et l'optique non-linéaire.

### 4.1.1 Modélisation du lien entre les mesures et l'objet

L'élaboration de modèles de propagation et des systèmes est cruciale à tout problème d'imagerie. Une approche très générale de la formation d'image en microscopie optique (de l'OCT focalisée au microscope standard en champ brillant) a été proposée dans [Sen18] et une modélisation vectorielle du microscope donnée dans [Kha19]. La modélisation intervient également au cœur de la conception et de l'optimisation des instruments d'imagerie. En collaboration avec G. Forbes (Macquarie University, Australie), nous nous appuyons sur une analyse des rayons pour analyser la détérioration des images induites par des erreurs de fabrication des appareils d'imagerie [Ary19, Lia19, Lia19b]. Enfin, en thermo-acoustique (génération d'onde acoustique par excitation micro-onde), une prise en compte rigoureuse de l'excitation électromagnétique a été introduite dans la modélisation des images obtenues et un modèle inverse a été développé dans le cadre d'une approche variationnelle [Akh16].

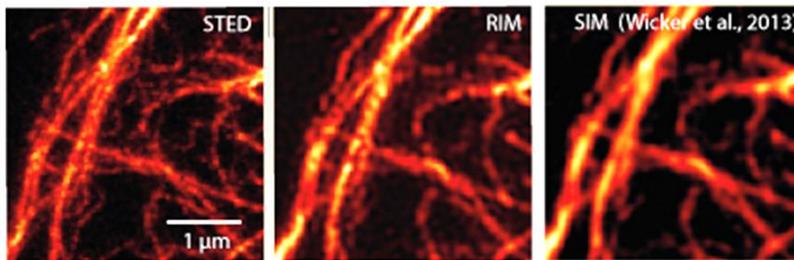
La modélisation inclut également les objets. Pour exploiter les données issues d'un capteur de glucose non invasif en cours de développement au CEA-LETI, un modèle permettant de relier la carte tridimensionnelle du coefficient d'absorption aux images optiques polarisées obtenues pour différentes longueurs d'onde a été développé. Il est basé sur la résolution de l'équation de transfert radiatif (ETR) résolue en polarisation (ETRV) [Tri17, Mac17]. En optique non-linéaire, le lien entre le tenseur de polarisabilité d'ordre 3 et les images obtenues en microscopie optique non linéaire Cohérent Raman Anti-Stokes Scattering (CARS) avec des faisceaux pompes et Stokes a été modélisé [Heu19]. Ce modèle a ensuite été utilisé pour développer une méthode de tomographie champ large computationnelle, ptychoCARS [Heu21b], utilisant le savoir-faire du laboratoire dans le domaine en optique linéaire. Dans le domaine des hyperfréquences, une adaptation des modèles d'imagerie a permis de remonter non seulement aux permittivités mais également aux perméabilités magnétiques de matériaux à partir du champ hyperfréquence mesuré. Ceci a été mis en œuvre pour des matériaux à forts indices, mais de faibles épaisseurs, situation permettant de linéariser le problème inverse. Une validation expérimentale a été menée en collaboration avec le CEA Le Ripault pour vérifier *a posteriori* l'homogénéité de matériaux magnéto-diélectriques manufacturés [Fag17].

Enfin sur un terrain plus fondamental, en collaboration avec l'Institut Carnot de Bourgogne, nous avons mis en évidence les analogies spatio-temporelles frappantes qui existent entre la diffraction et la dispersion [Aud20b, Bos18] et introduit la notion de tache d'Arago (ou tache de Fresnel) dans le domaine temporel [Fin19].

### Techniques d'inversion pour retrouver l'objet à partir des données

Un imageur ne fournit pas toujours des mesures reliées linéairement aux paramètres d'intérêt de l'objet. Dans le domaine de l'imagerie électromagnétique (regroupant les microscopes optiques et les imageurs hyperfréquences), cette situation se rencontre lorsqu'on ne mesure que l'intensité du champ diffracté et/ou que l'objet est suffisamment grand et contrasté pour générer de la diffusion multiple. Cette situation complexifie fortement la mise en œuvre et la résolution du problème inverse. Dans ces cas difficiles, il a été montré que l'utilisation de la réciprocity des équations de Maxwell permet de formuler aisément un algorithme d'inversion linéarisé [Ung18, Ung19]. D'autre part, l'utilisation de mesures à plusieurs longueurs d'onde et prenant en compte la polarisation des champs diffractés permet d'améliorer significativement les résultats de l'inversion en présence de diffusion multiple [Eyr19, Zha18]. Enfin, un travail spécifique sur l'imagerie micro-onde d'astéroïdes a nécessité le développement d'algorithmes pouvant prendre en compte la grande taille de l'objet par rapport à la longueur d'onde [Sor20, Eyr18, Hér18].

En microscopie de fluorescence, des algorithmes d'inversion sont nécessaires pour reconstruire une image super-résolue de l'échantillon à partir d'images basse-résolution obtenues sous différents éclairages. Nous avons développé une méthode originale basée sur des éclairages de speckles inconnus, appelée Random Illumination Microscopy (RIM). La reconstruction numérique dans cette méthode est basée sur une analyse statistique des images [Lab17, Idi18, Neg18, Neg19]. L'algorithme a été déposé en invention protégée au CNRS [algoRIM Ref CNRS: DL13468-01]. D'autre part, une étude sur la réduction par déconvolution de la fluorescence hors focus a été menée [Neg19]. Cette méthode montre un gain de résolution robuste même en profondeur dans l'échantillon en présence d'aberrations [Man21].

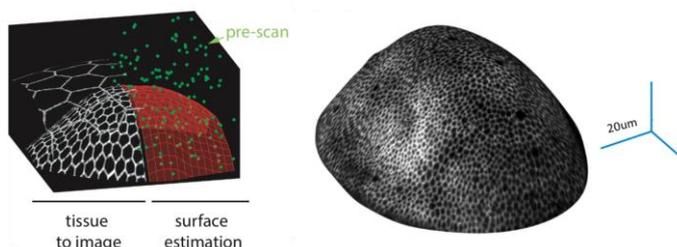


**Figure T4-1** : Comparaison sur le même échantillon (F-actine en cellule de culture) des performances du RIM (au centre) et de deux systèmes commerciaux de super-résolution [MAN21].

Enfin dans le domaine de l'imagerie X cohérente, des algorithmes d'inversion ont été développés pour imager en trois dimensions des matériaux cristallins nanostructurés par ptychographie X en géométrie de Bragg sur sources synchrotrons. Les objectifs sont d'augmenter au maximum la portée opérationnelle [Hru17, Kim18, Kan19], d'affiner notre compréhension des limites pratiques et théoriques de la méthode [Hru17, Hil18, Fil18, Cal19, Mad19] et d'assurer le transfert de cette approche vers les synchrotrons.

#### 4.1.3 Co-conception de l'instrumentation et du traitement numérique

L'hybridation des approches signal-numérique et instrumentales, permet d'accéder à des performances accrues des systèmes d'imagerie optique. En microscopie optique nous travaillons, en collaboration avec les scientifiques du thème *Information et Photonique*, sur la conception d'instruments ayant une sensibilité maximale à des contrastes spécifiques comme la polarisation, la phase, l'orientation d'une molécule, ou les paramètres d'une nanostructure comme celles utilisées dans la fabrication des microcircuits [siv18, VEL19], avec la possibilité également de détecter les mesures non fiables [was16]. En lien avec l'activité en biologie des tissus (voir plus bas), nous développons de nouveaux microscopes de fluorescence à balayage qui adaptent leur schéma de balayage à l'échantillon observé. Des stratégies d'acquisitions itératives et propagatives permettent de faire converger l'échantillonnage de l'espace vers les zones d'intérêt de l'objet observé. Appliqué à l'imagerie des surfaces biologique (épithélie), cette approche de scan informé (smart-scan) permet de réduire l'irradiation de l'échantillon d'un facteur 20-100 sans perte de résolution [Abo21]. Deux brevets ont été déposés (FR2107819, FR2107822).



**Figure T4-2** : Méthodologie Smart-scan : les tissus biologiques s'organisent souvent en surfaces courbes (à gauche). Le microscope détecte automatiquement la surface d'intérêt et n'effectue un scan complet que sur cette surface estimée, réduisant l'irradiation lumineuse de plus d'un ordre de grandeur (image 3D résultante à droite).

En spectroscopie Raman, nous travaillons sur une technique instrumentale permettant d'accélérer la détection d'espèces chimiques en découpant des fenêtres spectrales dans le spectre Raman à l'aide d'un DMD (Digital Micro-mirror Device) et en mesurant l'intensité Raman à l'aide d'un détecteur monocanal (photodiode). Cette méthode est le pendant instrumental des concepts développés en collaboration avec le thème 'Information

et Photonique'. Pour cela, nous avons optimisé les masques des DMD et développé un algorithme original permettant l'estimation de la concentration d'espèces chimiques à partir du signal obtenu pour différents masques [Sco17, SCO18, Sco19, Stu19, Sco20]. Cette technologie est actuellement en pré-maturation CNRS et identifiée par les entreprises leaders du domaine comme une rupture technologique importante pour l'imagerie Raman, couvrant des applications très larges comme les microplastiques, la pharmacologie et l'imagerie chimique en général.

## 4.2 Instrumentation

L'instrumentation en imagerie à l'Institut Fresnel s'articule autour des contrastes optiques (phase, fluorescence, Raman), photo-acoustique et l'hyperfréquence.

### 4.2.1 Imagerie de phase

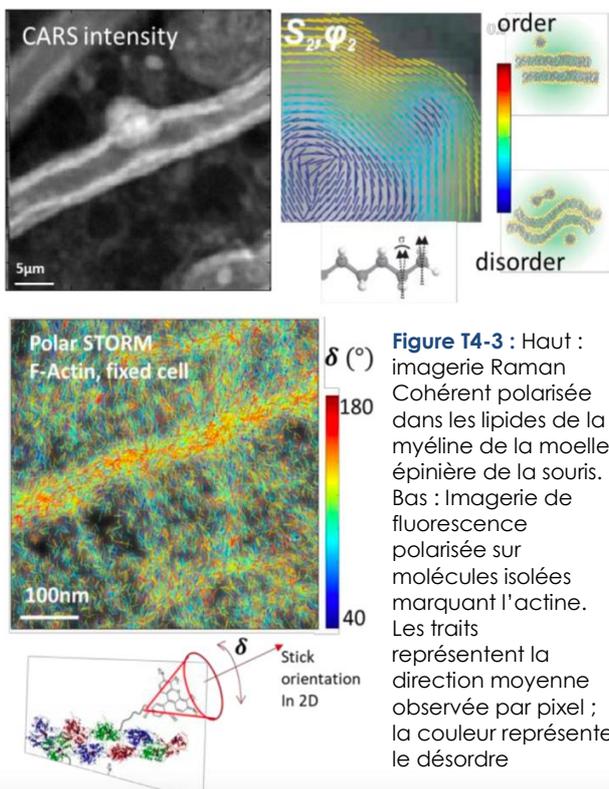
La technique de microscopie quantitative de phase par interférométrie à décalage quadri-latéral, issue d'une collaboration maintenant historique et toujours d'actualité avec la PME Phasics, a permis de nouvelles avancées significatives dans un large champ d'applications [BAF21]. En biologie, elle a permis l'imagerie cellulaire à haute résolution [ALL19], la cartographie de température à l'échelle micrométrique dans des cellules vivantes [ROB18] (contrat CIFRE avec l'entreprise Phasics), ou l'utilisation croisée avec la fluorescence en microscopie cellulaire très large champs (collaboration CEA-LETI) [DE19]. En endommagement laser, elle a permis de nouvelles mesures métrologiques [DOU17, RAD19]. En science des matériaux, nous avons développé des méthodes de caractérisation optique de matériaux 2D [KHA17], métasurfaces [KHA21] et nanoparticules [KHA18] (demande brevet déposée en 2019). Nous avons récemment démontré la pertinence de l'imagerie de phase pour la mesure de retardance optique liée à la biréfringence naturelle [AKN18] ou induite par contraintes [DOU17].

Les approches ptychographiques de restitution de phase développées notamment dans le domaine des rayons X ont trouvé un débouché prometteur pour l'imagerie quantitative de phase de matériaux anisotropes dans le domaine visible. Un banc expérimental de ptychographie dite vectorielle a été développé [FER18]. Dans sa version ultime, cette technique permet de reconstruire conjointement la matrice de Jones du spécimen imagé et la fonction d'éclairement utilisée [BAR19], sans nécessiter de faisceau de référence. Ces spécificités sont particulièrement précieuses pour l'imagerie de matériaux fortement anisotropes que sont les biominéraux.

Par ailleurs, nous avons montré qu'une approche tomographique en réflexion basée sur l'imagerie de phase (holographie hors-axe) et l'illumination sous différents angles successifs de l'échantillon permet de caractériser en 3D son contour avec une résolution bien meilleure que les microscopes standards [Mai18]. Ce travail a fait l'objet d'un brevet (brevet WO2019/121737) et a notamment été validé sur des cellules immunitaires [Ras20].

### 4.2.2 Imagerie de fluorescence et non linéaire polarisée

Les développements en imagerie polarisée, qui permettent d'accéder à de nouvelles informations sur



l'organisation moléculaire, ont permis de faire de l'imagerie polarimétrique 'live' un outil robuste utilisable en fluorescence [ANG19, Cho18, Loi18, Wan17], mais également pour des processus non-linéaires tels que la fluorescence 2-photons [Rou19, Ren19, Man19, Bal18, Kum17], et le Raman cohérent [Cle16, Gas17, Hof17, Cle17]. La combinaison de ces différents contrastes nous a permis d'étudier des effets nouveaux comme l'influence de sondes fluorescentes lipidiques sur l'organisation des lipides environnants [Gas02]. Nos instruments de microscopie polarisée sont pour la plupart uniques à l'échelle internationale, et font l'objet d'une dizaine de collaborations régulières (Marseille : CIML, IBDM, INT ; Paris : I Curie, IJM, Paris-Saclay Univ., Sorbonne Univ. ; Bordeaux : IINS ; Allemagne : U. Braunschweig ; UK : Univ. Exeter, Univ. Manchester ; USA : U. Brandeis ; Espagne : Univ. Madrid, ICFO). Nous avons enfin proposé des approches originales pour l'imagerie de fluorescence super-résolution polarisée, reposant sur la mesure de la localisation 3D et de l'orientation 3D de molécules uniques. Ce domaine est en pleine expansion à l'échelle internationale, avec un nombre croissant de laboratoires développeurs et utilisateurs dans le domaine. Nous avons démontré la possibilité de mesurer l'organisation moléculaire aux échelles nanométriques dans des systèmes biologiques (actine, amyloïdes, ...) à

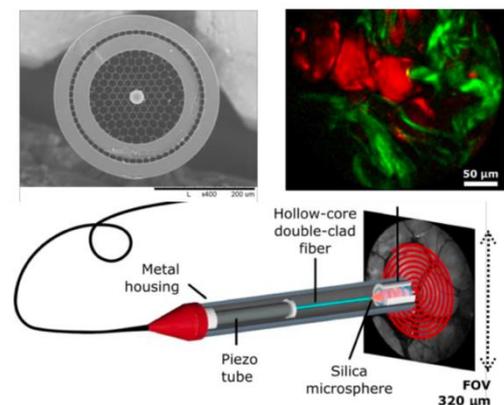
partir de séparation de polarisation [Cru16, Ahm17] ou de la manipulation de la phase polarisée dans l'imagerie de molécules uniques (« PSF engineering ») [Cur20]. Ces approches nécessitent des efforts conséquents en développements numériques pour la reconstruction des données et font donc l'objet de nouvelles collaborations avec des théoriciens et numériciens (institut Fresnel, Instituts Curie et Pasteur, Univ. Rochester USA) [Was16, Cur20]. Elles ont également un fort potentiel d'innovation (dépôt d'un brevet – n° 19306218.9, collaborations entreprises Horiba et AbbeLight).

#### 4.2.3 Imagerie non linéaire

- Nous développons depuis 20 ans des systèmes de microscopie originaux pour l'imagerie sans marquage dans les tissus biologiques, sur la base de contrastes de mélanges de fréquence et de processus Raman cohérents (CARS : coherent anti-Stokes Raman scattering ; SRS : Stimulated Raman scattering). Outre des contributions générales [Rig18, Aud20, Bar21] nous avons récemment amélioré la vitesse d'imagerie [Heu18a], permis l'acquisition d'images à deux fréquences vibrationnelles [Heu18b, Rig21], abordé une version 'champ noir' de CARS [Heu21], contrôlé les bruits parasites en SRS [Heu20b], et démontré une nouvelle imagerie SRS rapide aux très basses fréquences vibrationnelles [Rig19]. Ces développements positionnent le laboratoire comme lieu de référence dans ce domaine.

- Des innovations ont été apportées dans le but de rendre possible l'imagerie non linéaire dans les milieux diffusants. Nous avons développé une meilleure compréhension de la refocalisation d'impulsions courtes polarisées dans les milieux diffusants, par une démonstration d'un effet mémoire étendu en polarisation [De17], angulaire [Hof19] et spectral [Ves19, Zhu20]. Ceci nous a permis de montrer, dans un régime multi-spectral, la génération de signaux CARS à une profondeur de quelques centaines de microns dans des tissus diffusants [Hof20], qui est une première dans le domaine.

Afin de rendre possible l'exploration des organes en médecine par des contrastes non-linéaires (2-photon, SHG, CARS), nous avons développé deux technologies endoscopiques. La première technologie utilise des fibres creuses à double gaine et un scanner miniature [Lom18]. La deuxième technologie, dite 'endoscope sans lentille' utilise une fibre multi-cœurs et du façonnage de front d'onde. D'un diamètre de seulement 300  $\mu\text{m}$ , l'endoscope réalise la recombinaison cohérente de 200 faisceaux pour les focaliser et balayer dans l'échantillon [Siv18]. Nous avons par ailleurs démontré l'utilisation d'une fibre multi-cœurs aperiodique permettant d'élargir de champ de vue à quelques 150  $\mu\text{m}$  [Siv18b], le développement d'une fibre torsadée qui permet de rendre l'endoscope insensible à la courbure de la fibre [Tsv19] (dépôt d'un brevet – Brevet France N°1000480498), et une augmentation significative de la puissance délivrée en réalisant une structure focalisante micro-imprimée en bout de fibre [Siv21]. Une société, Lightcore Technologies (<https://lightcore.tech/>), a été créée en juillet 2019 pour valoriser les technologies Raman cohérentes et endoscopes non linéaires développés à l'Institut Fresnel.



**Figure T4-4 :** Structure de la fibre optique micro-structurée et technologie de balayage pour l'endoscopie non-linéaire dans un tissu tumoral : fluorescence 2 photon (rouge) et génération de seconde harmonique (vert)

#### 4.2.4 Autres contrastes

**Imagerie Photoacoustique.** L'absorption de la lumière par un milieu entraîne une augmentation locale de la température et dilatation à l'origine du signal photoacoustique. Ce signal comporte des informations sur les propriétés mécaniques et optiques du milieu sondé que nous exploitons pour l'imagerie des cancers par tomographie photoacoustique [Das17] et pour lequel nous optimisons des agents de contraste [Lav18]. La méthode est actuellement appliquée à l'étude de la viabilité du disque intervertébral dans le cadre d'un partenariat avec le Prof. O. Boiron (IRPHE, Centrale Marseille) via le co-encadrement de deux thèses : A. Capart (IF) sur le dosage relatif eau/collagène par imagerie photoacoustique, et R. Allais (IRPHE) sur l'utilisation de la photoacoustique pour l'étude des propriétés mécaniques. Par ailleurs, nous développons un système d'imagerie photoacoustique utilisant une détection optique des ultrasons pour imager l'activité neuronale en profondeur chez le petit animal avec une résolution quasi-cellulaire.

**Imagerie Hyperfréquence.** Nous développons un nouvel instrument hyperfréquences pour l'imagerie du sous-sol dans le cadre d'une collaboration avec l'entreprise Detect Réseaux dans le but de détecter des canalisations enfouies dans le sous-sol urbain (contrat de collaboration recherche CNRS n°180115). Nous développons aussi des outils d'imagerie microondes 3D en espace libre [Eyr18], notamment d'optimisation de mesure de champs diffractés [Eyr18, Eyr19].

**Diffusomètre pour étudier la filtration des eaux par membranes.** Nous avons développé des techniques optiques non invasives pour caractériser le pouvoir de rétention des membranes utilisées pour la filtration de l'eau et comprendre les processus de colmatage. Ainsi, nous avons pu analyser le pouvoir de rétention et la manière dont sont retenues les nanoparticules par des membranes utilisées pour la fabrication de l'eau potable [LeH18, LeH18b]. Ce projet est mené en collaboration avec l'équipe EPM du laboratoire M2P2.

### 4.3. Biologie

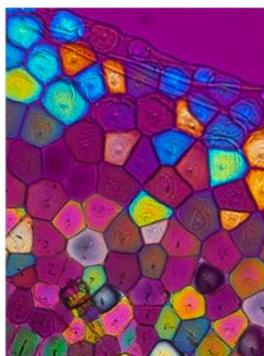
La biologie s'est récemment imposée comme un objet d'étude en plus d'être un moyen de valoriser les outils développés à l'Institut. Une approche multidisciplinaire à l'interface de la biologie et de la physique reste au cœur de ces nouveaux projets.

#### 4.3.1 Morphogénèse des cellules et tissus

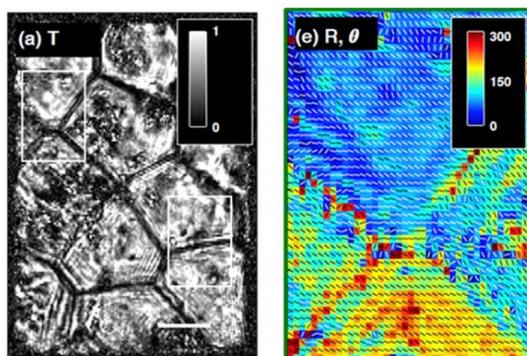
Nous avons développé des outils moléculaires et biochimiques qui nous ont permis d'isoler, pour la première fois, des complexes recombinants de septines animales, afin de reconstituer *in vitro* l'assemblage de ces protéines du cytosquelette et leurs interactions avec les filaments d'actine et des membranes biomimétiques [Lv21, Szu21]. Sur la base des développements moléculaires et instrumentaux du laboratoire, nous avons initié une activité de recherche sur la morphogénèse des cellules et des tissus, étudiés sous l'angle de la physique [Ben19]. Initié très récemment, cet axe de recherche mobilise un nombre croissant d'étudiants et intègre une forte composante interdisciplinaire au laboratoire. Des collaborations très actives ont été établies afin de développer des modèles théoriques de la morphogénèse (plusieurs collaborations avec le département de physique de l'ENS Paris), et de développer de nouveaux outils d'imagerie du vivant en lien avec l'activité en instrumentation du thème (microscopie de fluorescence polarisée) et l'activité du thème *Information et photonique* (développement de microscopes adaptatifs).

#### 4.3.2 Biominéralisation

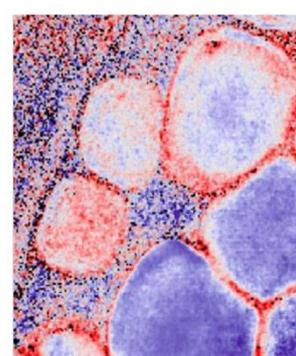
La biominéralisation intègre des phénomènes physico-chimiques complexes, bio-contrôlés par les organismes vivants. Nous combinons des microscopies nouvelles développées à l'Institut avec des approches à l'état de l'art, pour progresser dans la compréhension des processus de biominéralisation [Mas17]. Notre objectif est de produire un modèle synthétique pertinent, intégrant les processus physiques, chimiques et biologiques (collaboration CEA, Saclay, IFREMER polynésie, Argonne National Labs, ESRF Grenoble, DTU Copenhague ; Oxford Univ ; projet ERC Consolidator 3D BioMat).



**Figure T4-5-1 :** Bord de croissance d'une coquille d'huître perlière, observé en microscopie de biréfringence.



**Figure T4-5-2 :** Caractérisation d'une coquille d'huître par ptychographie optique vectorielle : carte de transmittance (gauche) et retardance (droite, code couleur en nm, l'orientation de l'axe rapide est indiqué par les traits).



**Figure T4-5-3 :** Cartographie Raman Cohérent de deux polymorphes du carbonate de calcium (calcite en bleu, carbonate de calcium en rouge) sur une coquille d'huître perlière.

#### 4.3.3 Imagerie non-linéaire label-free en Biologie

En collaboration avec L'OREAL, nous avons démontré pour la première fois que l'imagerie CARS permettait de suivre la progression d'un actif moléculaire dans la peau *in vivo* chez l'humain [SAR19b]. Nous appliquons aussi l'imagerie CARS à l'étude des processus de 'dé' et 're'-myélinisation dans la moelle épinière de souris transgéniques développant une maladie neurodégénérative, complétée par des approches de microscopie polarisée [Rou16, Gas17, Haj18].

#### 4.4. Médical

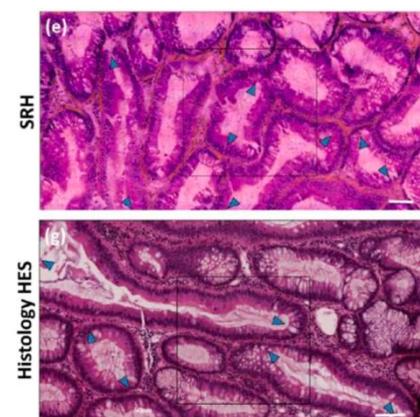
La recherche médicale à l'Institut se fait à travers des développements instrumentaux appliqués à la médecine ainsi que par la pratique hospitalière. D'une part, l'Institut Fresnel a établi un lien collaboratif étroit avec la clinique et le médical (Institut Paoli Calmette, Hôpital de La Timone, plateforme du CERIMED) pour l'application de certains de ses instruments ; d'autre part une équipe de 11 membres permanents praticiens hospitaliers AP-HM (IMOTHEP) localisée sur le campus de la Timone a rejoint le laboratoire en 2018 pour coupler diagnostic et traitement via l'imagerie nucléaire médicale, en étroite collaboration avec les scientifiques du traitement des images (voir thème *Information et Photonique*).

##### 4.4.1 Biomarqueur et Theranostique en médecine nucléaire

Nous utilisons l'imagerie quantitative de tomographie par émission de positron (TEP) et par émission monophotonique (TEMP) de biomarqueurs physiologiques, principalement pour les pathologies cérébrales, dans une approche de médecine personnalisée. Cette activité se fait en collaboration étroite avec le thème *Information et Photonique* concernant l'analyse des données physiologiques. L'imagerie est associée à une thérapie ciblée telle qu'une neuromodulation cérébrale (collaboration Multiwave pour la TMS, brevet FR3080293) ou une thérapie radioactive en neuro-oncologie (radio-théranostiques - collaboration AAA/Novartis pour le traitement des méningiomes [Gue19]). L'objectif est de mieux comprendre et caractériser les maladies, améliorer le diagnostic précoce, mieux définir le pronostic, ainsi que guider et évaluer l'efficacité des traitements.

En 2018-19, notre effort s'est porté sur l'imagerie au  $^{18}\text{F}$ -FDG de la consommation de glucose [Ver18] : L'analyse de la structure spatiale du signal, incluant une approche par analyse de graphes [Ver18b], offre une mesure de connectivité métabolique cérébrale [Ver18c, Ver19] dans le contexte des pathologies du mouvement et des phobies. Nous avons aussi développé une méthode de suivi au cours du temps de l'activité métabolique pendant des thérapies psychiatriques par réalité virtuelle [Mal19, Ver18c]. Nous l'utilisons dans le contexte du stress post-traumatique (en collaboration avec le ministère de la Défense) et des phobies (acrophobie). Nous avons développé une plateforme associant TEP/TEMP et réalité virtuelle. Ces approches ont par ailleurs permis pour la première fois de caractériser l'atteinte cérébrale associée au COVID-19 (<http://fr.ap-hm.fr/actu/covid-long-le-vecu-des-patients-corrobore-par-l-imagerie-cerebrale>).

##### 4.4.2 Histologie Raman Cohérent et cartographie chimique sur médicaments



Nous avons démontré l'utilité de l'imagerie SRS pour réaliser des images histologiques de tissus humains fraîchement excisés lors des chirurgies gastriques et neurologiques. Cette nouvelle approche, dénommée SRH (stimulated Raman histology), permet d'imager des tissus en quelques minutes et d'en donner le diagnostic cancéreux [SAR19, SAR19c, SAR21]. En collaboration avec SANOFI, nous avons également démontré la pertinence de l'imagerie SRS pour cartographier des principes actifs polymorphiques ainsi que des excipients dans des pastilles orales pharmaceutiques [SAR19d].

**Figure T4-6** : Histologie Raman cohérent (haut) comparée à l'histologie standard (bas).

##### 4.4.3 Photoacoustique et Thermo thérapie

Nous avons par ailleurs participé au développement d'un dispositif expérimental multimodal pour le traitement du glioblastome par thermo thérapie induite par chauffage de nanoparticules (localisé au CERIMED -Campus Timone, Marseille)[Bas21]. L'instrument [Met21] repose entre autres sur un transducteur ultrason permettant la mesure de température par photoacoustique (mode détection) et l'ouverture de la Barrière Hémato Encéphalique (BHE) par FUS (Focused Ultrasound sonification) afin de favoriser le passage des nanoparticules [POP19]. Ce travail s'effectue en collaboration avec le LMA, l'INP et le CERIMED à l'hôpital universitaire de la Timone (APHM), et le CEA Neurospin.

##### 4.4.4 OCT/diffusion sur Cornée

Nous avons développé un instrument permettant de détecter des altérations de la cornée par diffusion de la lumière. Les données sont analysées et confrontées à des modèles électromagnétiques adaptés de la diffusion lumineuse du tissu cornéen. Des signatures liées à des états pathologiques permettent de diagnostiquer des modifications du tissu avant même qu'ils ne soient détectables avec les instruments commerciaux existants

[Gil19]. Ce travail fait l'objet d'un brevet (n° FR 3089629) et est mené en collaboration avec le service d'ophtalmologie de l'Hôpital Universitaire de La Timone (AH-HM).

### Référence 1. La production scientifique de l'équipe satisfait à des critères de qualité.

Sur la période 2016-2021, la production scientifique s'élève à 274 publications dans des revues internationales à comité de lecture (RICL) parmi lesquelles 210 impliquent un membre du thème en premier/dernier/corresponding auteur. Ce qui équivaut en moyenne à 45.5 RICL par an et 1.9 RICL/ETP/an. La production du thème se concentre sur les journaux d'optiques (21 Optics Letters, 24 Optics Express, 12 Biomedical Optics Express, 12 JOSAs, 5 ACS Photonics). Elle inclut aussi des publications dans des journaux généraux et spécialisés à fort impact (6 Nature Communications, 2 Nature Materials, 7 Optica, 2 Light Science & App, 3 PRL, 1 PNAS) ainsi que des journaux en médecine (16 European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging).

Les membres du thème ont été invités dans 75 conférences pour présenter leurs travaux, ce qui reflète la reconnaissance de la recherche du thème imagerie à l'échelle internationale. Quelques faits marquants présentés dans le portfolio attestent de la contribution du thème Imagerie à l'avancée des connaissances.

Les publications impliquent de nombreux et divers partenariats nationaux et internationaux (quelques exemples – Marseille : CIML, IBDM, INT, CRCM, INMED ; Paris : I Curie, IJM, Paris-Saclay Univ., Sorbonne Univ. ; Bordeaux : IINS ; ESRF Grenoble ; CEA, Saclay, IFREMER polynésie ; Allemagne : U. Braunschweig ; UK : Univ. Exeter, Univ. Manchester, Oxford Univ ; USA : U. Brandeis, Argonne National Labs ; Espagne : Univ. Madrid, ICFO ; DTU Copenhagen ; Macquarie University, Australia).

### Référence 2. La production scientifique est proportionnée au potentiel de recherche de l'équipe et répartie entre ses personnels.

Les travaux du thème Imagerie se répartissent sur une large gamme de domaines scientifiques : Optique, électromagnétisme, imagerie, biophysique, biologie, médecine (médecine nucléaire, imagerie fonctionnelle, théranostique).

Notre production moyenne annuelle est de 1.9 RICL/ETP/an, ce qui tenant compte des disparités thématiques du thème est une très bonne moyenne. Seul trois membres du thème n'ont pas publié sur la période car leur activité est exclusivement concentrée sur la médecine hospitalière.

Les jeunes chercheurs contribuent largement à la production scientifique, puisque 70% des publications impliquent au moins un étudiant, postdoctorant ou ingénieur de recherche en CDD. Concernant la production spécifique des étudiants, 35% des publications impliquent au moins un étudiant. Tous les étudiants sont amenés à publier au cours de leur thèse (requis par l'école doctorale). Concernant les post-doctorants et ingénieurs de recherche, 78% ont publié lors de leur séjour (la fraction des non-publiants correspond en large partie aux recrues récentes).

## Synthèse de l'autoévaluation

Le thème a maintenu une production scientifique conséquente et de qualité tout au long de la période évaluée. La très grande diversité des thématiques scientifiques implique naturellement des différences de production - les pratiques de publication sont très différentes par exemple entre la biologie, la médecine ou l'instrumentation. Cependant, chaque sous-thème a maintenu une production aux meilleurs standards de son domaine.

## Domaine d'évaluation 4 : Inscription des activités de recherche dans la société

### Unité

**Activité vers les mondes non-académiques.** L'institut Fresnel est très actif dans ses relations avec les acteurs du monde socio-économique, justifiant son appartenance à l'Institut Carnot STAR. Ces activités représentent environ 15% de l'activité totale au sein du laboratoire et se structurent suivant différentes approches. Sur la période de l'évaluation, on dénombre plus d'une cinquantaine d'entreprises avec lesquelles le laboratoire a collaboré. Ces entreprises sont issues de secteurs très différents tels que le médical, la défense, le spatial, les télécommunications...

L'institut Fresnel a tout d'abord su mettre en place des partenariats forts, structurés et pérennes avec des industriels avec lesquels il existe un historique de collaborations. Ces liens privilégiés se sont traduits par la mise en place de 3 laboratoires communs (voir <https://www.fresnel.fr/spip/spip.php?rubrique30> et Annexe 4) : LAPTOP créé avec la société CILAS Ariane Groupe (2014, renouvelé en 2018 et en cours de renouvellement pour la période 2022-2025), qui porte sur les méthodes de contrôle optique, la diffusion, le rayonnement infrarouge ou l'absorption dans les composants en couches minces optiques ; OpenLab Automotive Motion Lab (renouvelé en 2016 et dans lequel l'institut Fresnel coordonne l'axe "Lumière et véhicule"), qui porte sur les technologies de viseurs tête haute, l'aide visuelle à la conduite et le développement d'un "nez optique" (détecteur d'odeur ultra-sensible sur la base de composants multicouches) ; et LOLaH avec le CEA (2020), qui porte sur la métrologie de la tenue au flux laser des composants, les procédés de structuration et de réparation et la modélisation des matériaux pour les applications optiques et hyperfréquences. Ces trois laboratoires rassemblent un grand nombre des activités de l'institut Fresnel puisqu'ils concernent les activités composants, lasers, métrologie et micro-ondes. Cette synergie illustre clairement comment l'institut Fresnel a su intégrer les besoins des acteurs du monde non-académique et adapter ses compétences scientifiques et technologiques pour développer une politique scientifique qui répond à la fois aux besoins de ses partenaires mais également à une production scientifique élevée comme l'illustrent les nombreuses publications scientifiques co-signées avec des industriels mais également la vingtaine de brevets déposés (dont 5 ayant fait l'objet d'une licence d'exploitation). Il est important de noter enfin que la forte synergie avec le CEA de Cadarache a permis la mise en place d'une chaire CEA/ECM portée par un EC du laboratoire (chaire MATLASE) sur l'étude et la caractérisation des propriétés de MATériaux à haute température par l'utilisation de technologies LASER.

L'institut Fresnel a également mis en place 15 thèses CIFRE avec des industriels sur des sujets couvrant l'ensemble des 4 thèmes scientifiques. Ces thèses CIFRE ont permis de renforcer les liens avec les partenaires industriels puisque l'on peut noter que pour la majorité des industriels qui ont mis en place ce type de contrats, l'expérience a été renouvelée et plusieurs doctorants se sont succédés. De plus, 45% des doctorants ayant soutenu une thèse au sein de l'I. Fresnel ont trouvé ensuite un emploi dans le secteur privé. Au-delà de l'aspect purement scientifique, ce constat montre également que les connaissances et savoir-faire développés par les doctorants sont en fort accord avec ceux requis par les entreprises du domaine.

L'I. Fresnel a obtenu un grand nombre de projets académiques impliquant des partenaires non académiques, que ce soient des projets Européens (FET-OPEN, ITN, ACPHAST, PhotonHub...) ou des projets nationaux (ANRs PRCE, 1 projet FUI).

Un autre aspect lié à l'emploi a récemment pris une part importante à l'institut Fresnel et est lié au plan de relance économique mis en place en 2021 par le gouvernement. A ce jour, l'institut Fresnel accueille 2 ingénieurs de la société Multiwave Imaging qui travaillent notamment sur le développement d'antennes et de métamatériaux pour des applications d'imagerie et en particulier d'IRM et 1 ingénieur de la société KAER LABS dans le domaine de la tomographie optique. L'activité avec Multiwave va au-delà de ce plan de relance puisque 4 thèses CIFRE ont été financées 2 brevets ont été co-déposés et 2 projets Européens H2020 ont été obtenus (MCUBE et MONE) sur le développement d'antennes IRM. Enfin, cette collaboration a mené à l'obtention d'une Chaire Industrielle A\*Midex entre Multiwave et l'I. Fresnel (2021). C'est un exemple emblématique qui traduit le type de relations industriel/académique très riches qui ont été mises en place au sein de l'unité.

Les activités matures de l'institut Fresnel ont été regroupées au sein des plateformes *Photonique* et *Diffusif* (voir Section D2R4 et Annexe 3) dans lesquelles des instruments uniques au plan national (voire international) ont soit une ouverture vers des partenaires extérieurs soit sont dupliqués à cet effet (c'est notamment le but du projet Equipex IDEC). L'activité prestations est ainsi bien présente au sein de l'institut Fresnel et représente environ 10% de l'activité totale du laboratoire. Ces plateformes sont également un lieu de formation puisque 3 formations continues dédiées aux professionnels industriels dans les domaines des lasers, des couches minces optiques et de l'imagerie biophotonique ont été dispensées à plusieurs reprises au cours de ces 6 dernières années avec un total de plusieurs dizaines d'ingénieurs et techniciens formés.

Cette maturité des technologies a également permis en 2019 la création d'une startup (Lightcore Technologies, <https://lightcore.tech/>) dont l'objectif est de transformer les outils de laboratoires en des outils commerciaux qui pourront être installés dans des laboratoires, entreprises ou hôpitaux. Les technologies développées englobent des microscopes multiphotons et des endoscopes flexibles pour l'imagerie par fluorescence et l'imagerie sans marquage, comme la génération de seconde harmonique (SHG) et les processus Raman cohérents (CARS et SRS). Cette start-up qui emploie 6 personnes (dont 3 personnes ayant été formées au sein du laboratoire) est actuellement partiellement hébergée dans les locaux de l'institut Fresnel. Elle est aujourd'hui en cours de transfert vers des locaux dédiés adaptés à l'activité.

Enfin, la communication avec les tutelles, et les entreprises joue un rôle central dans le politique de l'institut Fresnel. Nous travaillons ainsi en étroite collaboration avec les SPV de nos tutelles (AMU, CNRS, ECM et leurs filiales) et les aidons comme pour la mise en place des outils relatifs aux prestations ou projets via le CNRS. Nous

les rencontrons régulièrement (plusieurs fois par an) ainsi que les autres structures de valorisation telles que la SATT, CNRS Innovation, CENTURI. Ce type d'échange est important compte tenu du grand nombre de projets de maturation avec la SATT qui ont été mis en place au sein de l'I. Fresnel (7) ainsi que pour prendre en compte les politiques scientifiques de nos tutelles (nous avons notamment rencontré en 2020 M. Jean-Luc Moullet, le Directeur général délégué à l'innovation du CNRS). La communication efficace de l'information et des opportunités de valorisation vers les chercheurs et leur sensibilisation à cet aspect du métier de chercheur est une des raisons de cette forte activité en lien le monde non-académique. Enfin, nous appliquons au quotidien une politique volontariste pour mettre autour de la table des industriels et académiques, en particulier via l'Institut Carnot. Cela a été le cas au travers de diverses rencontres mises en place à l'échelle du laboratoire avec des entreprises comme Oberthur Fiduciaire, ST-Microelectronics, Cailabs, Swatch... dont bon nombre ont donné lieu à des projets collaboratifs.

**Partage des connaissances avec le grand public et à l'échelle de la société.** L'activité réalisée au sein de l'institut Fresnel présente de nombreuses facettes du fondamental jusqu'à l'appliqué ce qui la rend attractive vis-à-vis du public non spécialiste. Les publications des personnels sont tout d'abord très régulièrement relayées dans des communiqués de presse des tutelles (plus d'une trentaine de communiqués CNRS et AMU sur la période de référence).

Nous menons de nombreuses actions pour la diffusion de la connaissance. Le premier type d'actions concerne l'organisation de manifestations grand public. Nous avons ainsi communiqué dans le courant de l'année 2019 sur deux événements majeurs directement liés au Laboratoire, à savoir les 80 ans du CNRS et le Bicentenaire de la Théorie Ondulatoire de la Lumière (1819 – 2019) et en particulier l'organisation en Janvier 2020 d'une journée dédiée à cet événement incluant 3 conférences grand public ouvertes à tous (personnel de l'université, étudiants, lycéens, passionnés) et des expériences et démonstrations associées. Cet événement a réuni plusieurs centaines de personnes et montre notre volonté de communiquer de manière accessible sur nos activités. Les chercheurs ont également participé à plusieurs conférences grand public et les enregistrements sont disponibles sur la chaîne YouTube du laboratoire (<https://www.fresnel.fr/spip/spip.php?page=video>). Enfin, nous avons été actifs dans l'organisation de l'exposition Femme et Science à laquelle plusieurs chercheuses de l'institut Fresnel ont activement participé.

L'autre axe important concerne l'aspect médiation, média et réseaux sociaux. Nous encourageons les chercheurs à partager leurs connaissances et activités lors des événements tels que la nuit des chercheurs auxquelles plusieurs chercheurs et doctorants participent chaque année sur différents formats (exposés, rencontres...). Il y a également une activité remarquable dans le développement de vidéos destinées au grand public pour informer sur nos projets (films sur les projets Européens MCUBE, MONE, films DOC2AMU des doctorants financés par le programme COFUND AMU sur leurs activités de recherche), la réponse aux sollicitations des médias et tutelles (film AMidex sur les plateformes) mais encore le tournage de films sur des thématiques spécifiques (vidéos sur la couleur des papillons avec le conseil général/régional, sur la diffraction...). Toutes ces vidéos sont également disponibles sur le compte YouTube du laboratoire. Le site web de l'institut Fresnel a été entièrement refait en 2016 et est depuis régulièrement mis à jour (<https://www.fresnel.fr/spip/>). C'est une évolution importante dans le but de communiquer efficacement vers l'extérieur et nous avons rejoint différents réseaux sociaux : en 2016 LinkedIn avec une page entreprise (<https://www.linkedin.com/company/institut-fresnel>, 865 abonnés) et une page alumni et étudiants potentiels (1050 abonnés), en 2017 un compte Twitter régulièrement alimenté (<https://twitter.com/institutfresnel?lang=fr>, 1324 Tweets, 665 abonnés), et en 2021 un compte Facebook et Instagram.

Le dernier axe concerne la communication vers les plus jeunes. Nous sommes actifs en ce sens au travers de deux actions majeures. La première concerne la participation aux événements locaux ou nationaux tels que le Souk des Sciences ou les journées de la Fête de la Science au cours desquelles les chercheurs et doctorants présentent des propriétés et applications relatives à l'optique et la photonique (propagation de la lumière, diffraction, microscopie...) à l'aide d'expérimentations qui ont été spécifiquement développées en interne. L'autre aspect concerne l'attractivité de l'Institut Fresnel vers les étudiants universitaires et des écoles d'ingénieurs. Nous participons donc chaque année aux journées recherche à Polytech ou à l'école Centrale Marseille pour présenter nos activités de recherches et en particulier les nombreux stages que nous proposons aux niveaux License ou Master. Nous accueillons enfin très régulièrement des groupes d'étudiants d'Aix-Marseille Université ou de l'école Centrale Marseille pour des visites de nos activités ou visitons des classes de la primaire au Lycée pour les sensibiliser à l'importance de l'optique et de la photonique dans notre quotidien.

## Thème n° 1 Modélisation Electromagnétique

### Référence 1. L'équipe se distingue par la qualité de ses interactions non-académiques.

L'orientation scientifique du thème Modélisation électromagnétique est à vocation amont et théorique et se prête moins au développement de projets collaboratifs avec les industriels. Dans ce contexte, il est remarquable

que dans le périmètre de ce thème, 5 projets financés par l'ANR ont impliqué des industriels. Les activités de modélisation du thème ont permis d'obtenir trois projets ANR ASTRID avec pour applications des fibres optiques microstructurées ou des cavités résonantes de nouvelle génération. Le quatrième projet financé par l'ANR concerne le développement de capteurs basés sur des guides d'onde nanostructurés pour une application de détection de polluants dans l'eau (IFREMER). Le cinquième projet financé par l'ANR a été mené en partenariat avec l'industriel Groupe PSA et le C2N pour développer un système d'affichage innovant avec des métasurfaces pour une application de vision tête haute pour les véhicules du futur (résultats présentés dans un article de la lettre innovation du CNRS, numéro 45, septembre 2018).

### Référence 2 : L'équipe développe des produits à destination du monde socio-économique.

Les activités du thème ont mené au dépôt de 2 brevets et 2 déclarations d'invention au cours de la période 2016-2021. Les brevets portent sur l'application des métamatériaux à la protection contre les ondes sismiques et au contrôle de la diffusion des médicaments dans les tissus vivants. Trois collaborations avec des partenaires industriels ont été menées avec les industriels CERSA MCI (étirement de fibres optiques) et Detect réseaux (détection de réseaux souterrains).

### Référence 3. L'équipe partage ses connaissances avec le grand public et intervient dans des débats de société.

Les activités de recherche effectuées dans le thème Modélisation électromagnétique ont donné lieu à une conférence grand public « Invisibilité et mirage », un article « Invisibilité et transparence » dans la revue franco-portugaise de sciences humaines Sigila, un article dans la lettre innovation CNRS « Ajuster la réflectance d'un verre tout en préservant sa qualité de transparence », deux articles dans les magazines « Pour la science » et « Science et vie », et un fait marquant INSIS-CNRS « Une cape thermique active pour le contrôle ciblé de la température » et relayé par la NSF. Les membres du thème Modélisation électromagnétique accueillent tous les ans des collégiens en stage de 3ème.

### Synthèse de l'autoévaluation

Les activités amont et théoriques développées dans le thème Modélisation électromagnétique sont originales et d'une grande généralité, permettant ainsi de mener de nombreux projets en partenariat avec des industriels et proposer des concepts innovants. Ces activités permettent également de participer significativement à la diffusion de la culture scientifique (revue de vulgarisation, accueil de collégiens), et notamment des résultats théoriques ou de mathématiques appliquées.

## Thème n° 2 – Nanophotonique et Composants

### Référence 1. L'équipe se distingue par la qualité de ses interactions non-académiques.

Les personnels du thème sont impliqués dans les trois laboratoires communs (avec CILAS Ariane Group, le CEA et PSA Group / Stellantis) qui ont été reconduits ou créés au cours de la période 2016-2021. Ces interactions vont bien au-delà de la prestation de service et nous permettent de développer notre politique scientifique en collaboration avec des acteurs majeurs du monde socio-économique. Nous avons également bénéficié d'une chaire industrielle en partenariat avec la société Multiwave (1,3 M€ sur trois ans) et d'un plan de relance du CNRS (>200 k€).

Des prototypes innovants ont été proposés, comme par exemple des miroirs dédiés pour le projet ELI-NP ou éléments de sécurité pour les billets de banque. Nous avons également des collaborations soutenues avec le CNES (8 contrats de recherche au cours de la période) et le CEA (5 contrats). Les autres interactions concernent des grands groupes industriels (Saint-Gobain, Thales, Oberthur) et des entreprises spécialisées en optique (SOLNIL, EOLITE, Cristal Laser).

Au cours de la période 2016-2021, 7 doctorants en thèse CIFRE ont été accueillis au sein du thème 2. Tous ces éléments illustrent notre volonté d'élever les interactions non-académiques au meilleur niveau de qualité.

L'aspect formation vers le monde professionnel est également mis en avant au sein du thème avec des formations en interaction laser-matière et en couches minces optiques (4 sessions de formation sur la période) à destination des personnels des établissements de recherche publics et industriels.

## Référence 2 : L'équipe développe des produits à destination du monde socio-économique.

9 brevets et 7 déclarations d'invention ont été déposés au cours de la période 2016-2021 sur les composants optiques (lames structurées, empilements résonants...) et leurs procédés de fabrication (photopolymérisation laser, dépôt sous vide...). La majorité des brevets a déjà été étendue à l'international et 3 brevets font déjà l'objet d'une licence d'exploitation. Tous ces éléments combinés démontrent le dynamisme de notre politique active de gestion de la propriété intellectuelle.

Le thème poursuit bien évidemment des actions de communication auprès des acteurs du monde socio-économique au travers de nos nombreuses collaborations industrielles, nos 3 laboratoires communs, la participation à l'Institut Carnot STAR, la rédaction de documents techniques (publication dans Techniques de l'Ingénieur et Photoniques, Nicolas BONOD est rédacteur en chef de la revue Photoniques qui est également à destination de professionnels non-académiques).

## Référence 3. L'équipe partage ses connaissances avec le grand public et intervient dans des débats de société.

Le thème, comme l'ensemble du laboratoire, intervient dans la diffusion des connaissances vers le grand public. Ces actions impliquent les différents membres du thème, permanents et non-permanents. Le thème est présent annuellement lors de grandes manifestations de médiation scientifique comme la fête de la science ou la nuit des chercheurs. Sur la période 2016-2021, nous avons produit et publié 12 vidéos sur la plateforme Youtube au travers de la chaîne officielle de l'Institut Fresnel <https://www.youtube.com/channel/UCdgaQaR9FDEm8-m6C5ZSCbg>. Nous participons également régulièrement à des communiqués de nos instances (CNRS, AMU, ECM) et contribuons à alimenter le compte Twitter @InstitutFresnel du laboratoire. Des présentations dans les écoles ont également été menées par certains chercheurs et enseignants/chercheurs, notamment sur la couleur et le vide.

## Synthèse de l'autoévaluation

Le thème dans son ensemble mène une politique active de valorisation et de dissémination de ses résultats vers le monde non-académique. Nos nombreuses collaborations et interactions avec le monde industriel, notre politique incitative de protection intellectuelle et le dynamisme de notre communication sont autant de forces sur lesquelles le thème et l'ensemble du laboratoire peuvent s'appuyer.

## Thème n° 3 – Information et Photonique

### Référence 1. L'équipe se distingue par la qualité de ses interactions non-académiques.

Au cours de la période 2016-2021, de nombreuses collaborations avec des grands organismes (CNES, CEA, Ifremer, ONERA, ESA ...), de grands industriels (Thalès, PSA/Stellantis, CILAS Ariane Group, INNOLEA ...) ou des PME/TPE ont été menées, en particulier dans le cadre d'appels à projets étatiques (ANR, DGA/AID, INSERM), de contrats de recherche ou de prestations simples. 5 projets impliquant des industriels ont été financés auprès de l'ANR (3), la DGA / AID (1), l'INSERM/Plan Cancer (1) et 11 contrats de recherche ont été signés avec des acteurs du monde socio-économique.

Les méthodes et outils développés dans le cadre des collaborations du thème Information & Photonique avec les acteurs non-académiques permettent de couvrir un grand nombre de secteurs d'activités et d'enjeux sociétaux et environnementaux parmi lesquels : le spatial et les ondes gravitationnelles pour l'observation de l'univers, l'agronomie de précision en vue d'optimiser la gestion de l'eau et des ressources naturelles, l'identification de mélanomes pour la lutte contre le cancer, les télécommunications sous-marines, la télédétection hyperspectrale, l'avionique et la furtivité pour des questions de défense et sécurité, l'automobile du futur, la tomographie par impédance électrique pour la sûreté nucléaire...

Sur la période 10 contrats doctoraux ont été financés par nos partenaires (8 conventions CIFRE), 1 CNES / Région et 1 CNES/Entreprise.

On notera que le thème Information et Photonique est fortement impliqué dans les 3 laboratoires communs de l'Institut Fresnel avec : Stellantis intégré en 2016, CILAS Ariane Group renouvelé en 2018, et le CEA, créé en 2020.

### Référence 2 : L'équipe développe des produits à destination du monde socio-économique.

Au cours de ce quadriennal, 5 brevets ont ainsi été déposés dont 2 portant sur une nouvelle technique de microscopie pilotée par algorithmes de traitement d'image en collaboration avec le thème imagerie, et 3 étendus à l'international portant sur une nouvelle technologie de diffusomètre à 1 point permettant de mesurer la rugosité de manière immédiate.

Enfin, la plateforme DIFFUSIF, labellisée en 2017 et portée par le thème Information et Photonique, est considérée comme une plateforme de référence par les agences spatiales (CNES, ESA, NASA), l'AID et la communauté des détecteurs d'ondes gravitationnelles (LISA, Virgo, LIGO) pour la métrologie de la lumière diffuse et des faibles flux optiques. Elle est devenue, à ce titre incontournable pour les industriels internationaux de l'optique pour le spatial qui contractualisent avec elle de manière régulière (Thales Alenia Space, CILAS Ariane Group, Viavi Solutions, Iridian, Semrock, Zeiss, Hendstold, Optics Balzers Jena, Materion, TFSI, Mersen BOOSTEC ...) et co-financent certains de ses développements.

Les financements générés par les collaborations des acteurs du thème Information et Photonique avec le monde socio-économique sont de l'ordre de 400 k€ sur la période.

On notera également que les acteurs du thème Information et Photonique participent aux instances de normalisation internationales avec 1 membre nommé pour représenter la France dans la définition de la norme AFNOR/ CEN/ISO sur la métrologie de la lumière diffuse.

Le thème veille à diffuser ses résultats auprès des acteurs du monde socio-économique, à travers ses publications, mais également à travers la mise en place d'actions d'animation de la communauté intégrant des acteurs socio-économiques : implication dans l'organisation de conférences, dans l'animation de workshops, dans le montage et l'animation de GdR, ainsi que dans la création et la coordination de réseaux scientifiques à l'échelle européenne, à travers deux projets H2020 ITN et COST impliquant des partenaires industriels et académiques de 36 pays.

Enfin, compte tenu de ses activités fortes avec le monde socio-économique, les acteurs du thème Information et Photonique ont été sollicités en 2016 pour intégrer le réseau ACTPHAST (4.0 et 4.R) lors de sa reconduction. ACTPHAST est un réseau européen (H2020 ICT) d'une quarantaine de laboratoires développant des technologies optiques à haut potentiel de valorisation industrielle.

### Référence 3. L'équipe partage ses connaissances avec le grand public et intervient dans des débats de société.

Au cours de cette période, il est à noter que le thème Information & Photonique intervient dans la diffusion de connaissance à destination du grand public à l'occasion de différentes manifestations (fête de la science, nuit des chercheurs), mais également en ayant participé à plusieurs émissions radiophoniques nationales et à la rédaction de communiqués de nos instances sur certains de nos résultats les plus marquants.

## Synthèse de l'autoévaluation

Durant ce quadriennal, nous avons veillé à maintenir un équilibre entre les activités théoriques, numériques, instrumentales et applicatives. Il en résulte le développement de concepts, outils et méthodes publiés et reconnus par la communauté scientifique internationale mais également d'intenses interactions et collaborations avec le tissu socio-économique national et international.

## Thème n° 4 - Imagerie

### Référence 1. L'équipe se distingue par la qualité de ses interactions non-académiques.

Nos interactions scientifiques avec le monde industriel prennent diverses formes. Nous sommes impliqués dans le laboratoire commun LOLaH entre le CEA et l'I. Fresnel. Plusieurs projets impliquant des industriels ont été financés sur appels d'offre nationaux ou locaux : 2 ANR PRCE (entreprises AbbeLight, ACTIA), 1 ANR plan de relance (entreprise Kaer Labs), 1 contrat A\*Midex (entreprise Horus Pharma), 1 projet FUI (entreprises First Light Imaging, Photonlines et ExaVision). Plusieurs contrats de recherche attestent par ailleurs de liens solides avec les entreprises (6 avec L'Oréal, Sanofi, 2 Détekt Réseau, Anapix, Pic2Vision, CEA Leti, Horiba, RegenLife). Par ailleurs, 4 doctorants en thèses CIFRE ou cofinancées par des industriels ont été accueillis dans le thème (entreprises : CEA Leti/Horiba, First Light Imaging, Phasics (2 CIFRE)).

Afin de faciliter nos interactions avec le monde économique, la plateforme photonique met à disposition les équipements les plus aboutis dans le cadre de prestations de service.

### Référence 2 : L'équipe développe des produits à destination du monde socio-économique.

6 brevets (4 étendus à l'international, 2 faisant l'objet d'une licence) et 4 déclarations d'invention ont été déposés. Ces brevets concernent des procédés d'imagerie adaptative des tissus biologiques ; le transport d'impulsions laser pour l'imagerie non-linéaire endoscopique ; la microscopie super-résolue par réflexion totale ; l'imagerie orientationnelle. Finalement, une startup, spinoff de l'Institut Fresnel, a été créée : La société Lightcore Technologies qui développe des microscopes et endoscopes utilisant des contrastes non-linéaires appliqués entre-autre à l'anatomopathologie en milieu hospitalier.

Ces éléments attestent de l'importance prise par la valorisation de la recherche au sein du thème. C'est d'ailleurs les activités en imagerie qui justifient la participation de l'Institut Fresnel à l'Institut Carnot STAR, dont les activités sont liées au sport et à la santé.

Par ailleurs, nous soulignons l'implication des membres du thème dans des organisations expertes en lien avec le monde académique et socio-économique : membre du comité stratégique du pôle de compétitivité Optitec, Directeur de l'Institut Carnot STAR, directeur adjoint du GDR 2004 Imagerie et Microscopie en Biologie (IMABIO - comprenant un club de partenaires industriels important), membre du comité d'évaluation scientifique ANR CE42 « Capteurs, Instrumentation », expert régulier pour l'ANRT (dossiers CIFRE) et pour la DRRT (crédit impôt recherche).

### Référence 3. L'équipe partage ses connaissances avec le grand public et intervient dans des débats de société.

Les membres du thème, et notamment les étudiants en thèse, participent régulièrement à la fête de la science qui est un événement important pour l'I. Fresnel. Des collégiens sont aussi accueillis régulièrement par les membres du thème Imagerie, dans le cadre de leur stage de 3eme.

### Synthèse de l'autoévaluation

L'activité de recherche du thème imagerie s'inscrit pleinement dans la société et le monde non-académique. Nous entretenons des liens forts avec les industriels par le biais de contrats de recherches. Nous valorisons nos travaux par la protection intellectuelle. Nous dialoguons avec le monde industriel dans des organisations expertes. Et, finalement, nous avons créé une société commercialisant certain de nos produits de recherche.

## PORTFOLIO

## PORTFOLIO INSTITUT FRESNEL

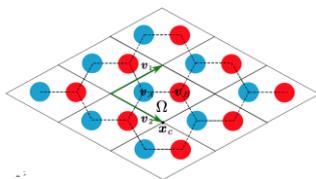
Les réalisations scientifiques présentées dans ce portfolio font état de faits marquants qui représentent, de manière non exhaustive, les actions les plus remarquables de l'unité sur la période 2016-2021. Nous avons cherché non seulement à mettre en valeur les recherches menées par les personnels de l'Institut Fresnel, mais aussi à refléter la diversité des volets sur lesquels ces personnels s'investissent : recherche fondamentale ou appliquée, recherche interdisciplinaire, recherche menant à des activités importantes de valorisation industrielle, et enfin disséminations. Ces faits marquants sont également le reflet d'une activité importante de collaboration des personnels avec d'autres laboratoires, éventuellement de disciplines très différentes (spatial, astrophysique et astrochimie, médical, biologie), et avec des partenaires non-académiques.

Les liens donnés dans chaque élément permettent d'accéder directement aux documents en ligne.

### Thème n°1 – Modélisation Electromagnétique (EM)

Les différentes réalisations du thème *Modélisation électromagnétique* ont été sélectionnées pour rendre compte de la qualité, l'originalité et la diversité des productions scientifiques et du rayonnement international des activités.

Les quatre premières réalisations scientifiques, dont trois publications et une thématique, montrent des outils de modélisation électromagnétique uniques sur la scène internationale, ainsi que la diversité des méthodes développées et de leurs applications : mathématiques appliquées pour les isolants topologiques, modélisation numérique pour les réseaux résonants en cavité, modélisation expérimentale micro-ondes pour l'imagerie, modélisation numérique pour les non-linéarités spatiales dans les guides d'ondes. La cinquième réalisation est un logiciel en libre accès de modélisation électromagnétique par la méthode des éléments finis développé en collaboration avec les universités de Liège et de Valencia. Les sixièmes et septièmes réalisations attestent de la reconnaissance internationale dans la thématique des métamatériaux avec la direction de quatre numéros spéciaux dans la revue *Compte Rendu Physique* et l'organisation du congrès international *Metamaterial'2017* à Marseille.



#### EM > Isolants topologiques et Mathématiques > 1

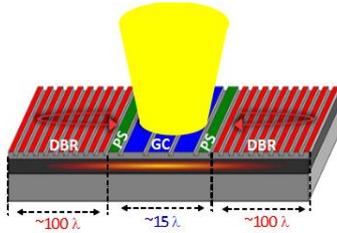
**Publication** : M. Cassier and M. I. Weinstein, *High Contrast Elliptic Operators in Honeycomb Structures*, SIAM, Multiscale Modeling and Simulation, Vol. 19, Iss. 4, pp. 1784-1856 (2021).

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03426875/>

La modélisation mathématique des isolants topologiques est une thématique en plein essor. En effet, initialement proposés pour aborder certains problèmes de la physique quantique comme l'effet Hall, les concepts de cette thématique de recherche irriguent désormais de nombreux domaines de la physique, notamment ondulatoire, allant de l'optique (cristaux phoniques) à l'hydrodynamique en passant par l'acoustique. Les applications potentielles sont nombreuses. Il est donc crucial de comprendre et de modéliser rigoureusement ces concepts afin de comparer les propriétés physiques de ces nouveaux effets (points de Dirac, états topologiquement protégés, ...). C'est précisément l'objectif de cet article de 73 pages publié dans une revue de mathématique de la *Society for Industrial and Applied Mathematics* (SIAM) et en collaboration avec un chercheur renommé en mathématiques, Michael Weinstein (Professeur dans les départements de physique appliquée et de mathématiques et de mathématiques à l'Université de Columbia, New-York).

Ce travail présente une première preuve mathématique de l'existence de points de Dirac dans les cristaux photoniques hexagonaux plans en régime fort contraste avec une localisation précise de ces points dans la structure de bande. Il établit également une comparaison en présentant de nombreuses différences entre le régime fort contraste pour les cristaux photoniques hexagonaux plans (équations de Maxwell transverse électrique) et le régime fort contraste en physique du solide pour le graphène (équation de Schrödinger) qui avait été étudié par Charles Fefferman (Professeur de mathématiques à l'Université de Princeton et médaille Fields), James Lee Thorp et Michael Weinstein dans leur article *Honeycomb Schrödinger operators in the strong binding regime*, Communications on Pure and Applied Mathematics, Vol. 71, Iss. 6, pp. 1178-1270 (2018).

**EM > Génération de seconde harmonique exaltée par l'excitation du mode sombre d'un réseau résonnant en cavité > 2**



**Publication** : A.-L. Fehrembach, F. Renaud, E. Popov, H. Tortel, A. Monmayrant, O. Gauthier-Lafaye, S. Calvez, *Dark mode-in-the-box for enhanced second-harmonic generation in corrugated waveguides*, Opt. Expr., Vol. 29 (25), pp. 40981 (2021).

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03465128>

Les réseaux résonnants en cavité (CRIGF pour cavity resonator integrated grating filter) sont formés par un réseau de couplage sub-longueur d'onde de quelques dizaines de périodes placé entre deux réseaux de Bragg, gravés sur un empilement de couches minces de matériaux diélectriques utilisé comme guide d'ondes (voir figure). Fonctionnant avec un faisceau incident recouvrant le réseau coupleur, les CRIGF possèdent des résonances étroites spectralement, caractérisées par une forte réflexion (>80%) et un fort champ électromagnétique concentré dans la couche guidante sous le réseau de couplage. La propriété de concentration du champ électromagnétique dans les CRIGF est exploitée pour renforcer les effets optiques non linéaires de second ordre, en particulier la génération de seconde harmonique.

Dans l'étude numérique présentée dans cette publication récente, nous montrons que l'utilisation de sections de jonction (PS, voir Figure) de longueurs différentes de part et d'autre du GC permet d'exciter un mode sombre. Le facteur de qualité de la résonance est alors de 57000 et l'efficacité de conversion  $\eta=4.31 \times 10^{-3} W^{-1}$ , soit 500 fois ce que nous avons obtenu lors de notre premier essai, avec un mode symétrique ( $\eta=8 \times 10^{-6} W^{-1}$  et facteur de qualité de 1700). Les principales applications visées à long terme sont des sources optiques performantes et compactes dans des gammes de longueurs d'onde où les solutions technologiques sont rares.

Avec les différentes méthodes numériques, générales ou spécifiques, qui sont développées par les membres du thème *Modélisation électromagnétique*, l'Institut Fresnel est à la pointe au niveau international dans la modélisation, l'étude numérique et l'exploration de nouvelles configurations de structures CRIGF (dimensions de plusieurs centaines de longueurs d'onde).



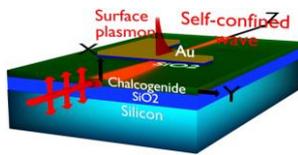
**EM > Analogie micro-ondes > 3**

**Thématique** : L'analogie micro-onde permet, par changement d'échelle et conservation de la permittivité, de mettre différents objets à une échelle optimale pour des mesures contrôlées de leurs interactions avec des ondes électromagnétiques dans une chambre anéchoïque. Nous avons récemment développé des méthodes de fabrication additive (I3D) qui permettent le contrôle de la permittivité et ouvrent de nombreuses perspectives (Sal2021, Sor2020). Récemment l'ERC a souligné l'intérêt de cette approche pour le projet Adv. Grant Dust2planet retenu et dont nous sommes partenaires: « *The idea of performing a unique microwave analogy experiment is highly appreciated by the panel* ». En découlent, notre participation au

projet Equipex+ IDEC, treize publications dans des journaux internationaux à comité de lecture variés et

souvent de fort impact (par exemple [Nature Comm. **8**, 13910 (2017)]), des collaborations avec les laboratoires IPAG et LabSTICC (projet 80 | Prime Experts), L2E, LPC2E, GSMA, GeePS ; avec les Instituts Pascal et Laplace ; et avec les universités de Cantabrie, Tampere, Moscou, Karlsruhe, et Madrid. Ces travaux sont aussi propices à de nombreux échanges avec le thème Imagerie (voir figure).

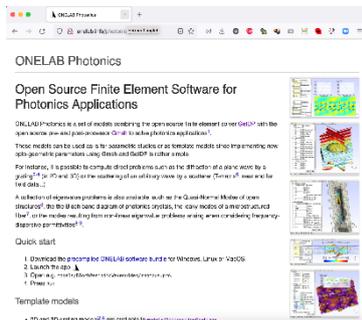
### EM > Non linéarités spatiales > 4



**Publication :** T. Kuriakose, G. Renversez, V. Nazabal, M. M. R. Elsayy, N. Coulon, P. Nemeč, and M. Chauvet, *Nonlinear Self-Confined Plasmonic Beams: Experimental Proof*, ACS Photonics, 7(9), pp. 2562-2570, 2020.

<https://hal-univ-rennes1.archives-ouvertes.fr/hal-02961176>

Grâce aux méthodes numériques spécifiques et à l'expertise acquises par plus de dix années de recherches dans l'étude des non-linéarités spatiales au sein des guides d'onde, une structure photonique ad-hoc permettant la première observation mondiale d'ondes non-linéaires auto-confinées au sein de structures plasmoniques a été conçue, fabriquée, et caractérisée [ACS Photonics, 7(9), pp. 2562-2570, 2020]. Cela faisait plus de quarante ans que ces ondes non-linéaires avaient été prédites par des travaux théoriques américains et russes. Les mesures ont pu être analysées et comparées avec succès aux résultats de nos simulations numériques. Ce travail a été proposé et piloté par l'Institut Fresnel et a réuni deux autres équipes françaises : l'Equipe Verres et Céramiques de l'Institut des Sciences Chimiques de Rennes pour la partie fabrication et l'équipe d'Optique non-linéaire de FEMTO-ST pour la caractérisation.



### EM > Modèle numérique éléments finis > 5

**Logiciel en libre accès :** <http://onelab.info/photronics/>

**Publication associée :** P. Lalanne, W. Yan, A. Gras, C. Sauvan, J. -P. Hugonin, M. Besbes, G. Demesy, M. D. Truong, B. Gralak, F. Zolla, A. Nicolet, F. Binkowski, L. Zschiedrich, S. Burger, J. Zimmerling, R. Remis, P. Urbach, H. T. Liu, T. Weiss, *Quasinormal mode solvers for resonators with dispersive materials*, J. Opt. Soc. Am. A 36, 000686 (2019).

<https://hal-iogs.archives-ouvertes.fr/hal-02348417>

Nous avons développé une bibliothèque de modèles pour la nanophotonique pour le logiciel open source ONELAB de modélisation numérique par la méthode des éléments finis. Nous illustrons à l'aide de quelques exemples une bibliothèque évolutive de modèles paramétrables couvrant une large gamme de dispositifs rencontrés en nanophotonique : diffraction par un réseau 2D et 3D, diffusion par une nanoparticule, calcul de la matrice de scattering, de diagrammes de bandes photoniques, de modes guidés, de modes quasi-normaux, etc... Celle-ci permet d'aborder facilement la simulation d'applications réalistes tout en permettant au spécialiste de développer ses propres modèles avancés.

Par exemple, nous avons mis au point plusieurs stratégies de calcul, compatibles avec les éléments finis, des modes quasi-normaux (QNM) en présence de dispersion. Un modèle open-source pour les problèmes aux valeurs propres dits non-linéaires résultant de cette prise en compte de la dispersion a été mis au point à partir des logiciels ONELAB/Gmsh/GetDP (collaboration avec C. Geuzaine, université de Liège, Belgique) et la bibliothèque SLEPC (collaboration avec J. E. Roman, université de Valencia, Espagne) [Comput. Phys. Comm. 257, 107509 (2020) ; J. Opt. Soc. Am. A 36, 000686 (2019)]. Les modèles résultant de ces collaborations, sont distribués librement sur le site <http://onelab.info/photronics/>



Comptes Rendus

Physique



### EM > Direction de quatre volumes dédiés aux métamatériaux dans la revue *Comptes Rendus Physique* de l'Académie des sciences > 6

**Direction de 4 numéros spéciaux :** *Comptes Rendus Physique*, Centre Mersenne, Tome 21, Volumes 4-5 & 7-8, (2020).

**Préface :** Boris Gralak and Sébastien Guenneau, « Foreword », *Comptes Rendus Physique*, Centre Mersenne, 21 (4-5), pp.311-341 (2020).

#### Accès diamant à ces volumes :

Volumes 1-2 [https://comptes-rendus.academie-sciences.fr/physique/issues/CRPHYS\\_2020\\_21\\_4-5/](https://comptes-rendus.academie-sciences.fr/physique/issues/CRPHYS_2020_21_4-5/)

Volumes 3-4 [https://comptes-rendus.academie-sciences.fr/physique/issues/CRPHYS\\_2020\\_21\\_7-8/](https://comptes-rendus.academie-sciences.fr/physique/issues/CRPHYS_2020_21_7-8/)

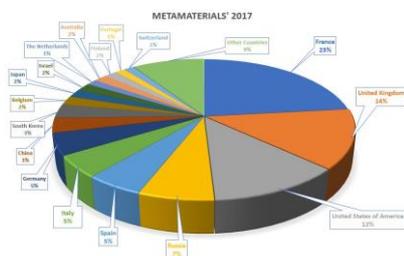
Préface : <https://comptes-rendus.academie-sciences.fr/physique/articles/10.5802/crphys.36/>

Sur invitation de Denis Gratias, membre de l'académie des sciences (section Physique), Boris Gralak et Sébastien Guenneau ont été rédacteurs en chef invités de deux doubles volumes dédiés aux métamatériaux dans la revue *Comptes Rendus Physique* de l'Académie des sciences.

L'appel à contribution a eu un succès important avec des contributions d'auteurs très prestigieux et en nombre suffisant pour quatre volumes (deux doubles volumes), alors que l'objectif initial était un seul.

**Un aspect important de ce travail est d'avoir obtenu que ces quatre volumes soient publiés en accès diamant** (accès libre et gratuit pour tous, aussi bien auteurs que lecteurs) avec le nouvel éditeur des *Comptes Rendus* de l'Académie des sciences, le Centre Mersenne, anticipant ainsi les recommandations de science ouverte et de gratuité totale des établissements.

La préface, qui est particulièrement étoffée (15 pages en français et traduction de 15 pages en anglais), reflète correctement le travail important qui a été effectué.



### EM > Organisation par l'Institut Fresnel à Marseille de la conférence internationale *Metamaterials'2017* > 7

**Conférence :** *The 11th International Congress on Engineered Material Platforms for Novel Wave Phenomena (ou Metamaterials'2017)*, 28-31 Août 2017, Marseille, France : 377 participants de 36 pays différents

**Ecole d'été :** *Modeling of Metamaterials*, 1-2 septembre 2017 : plus de 50 participants

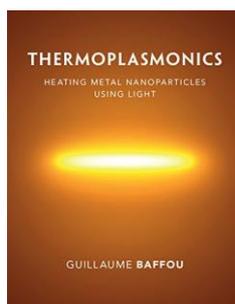
La société savante européenne METAMORPHOSE V. I. (Virtual Institute) a confié l'organisation de la 11<sup>ème</sup> édition de son congrès annuel *Metamaterials'2017* à l'Institut Fresnel à Marseille, attestant ainsi de la reconnaissance internationale dans le domaine des métamatériaux. Ce congrès a rencontré un véritable succès avec 377 participants de 36 pays différents à la conférence, plus de 50 participants à l'école d'été, et de très nombreux orateurs plénières et invités très prestigieux. L'organisation a été unanimement reconnue comme réussie et a contribué au rayonnement à l'international de l'Institut Fresnel.

Site web du congrès *Metamaterials'2017* : <https://congress2017.metamorphose-vi.org/>

## Thème n°2 – Nanophotonique et Composants (NCO)

**Choix de la composition** : le thème Nanophotonique et Composants étant structuré en 4 sous-ensembles spécifiques (nanophotonique, antennes optiques et radiofréquence, couches minces optiques et interaction laser-matière aux forts flux), nous avons souhaité reprendre cette structure dans le choix des éléments constituant ce portfolio pour faire ressortir la diversité et la complémentarité de nos activités.

Ainsi parmi les sept éléments du portfolio, nous avons sélectionné quatre publications et une monographie représentatives de notre positionnement scientifique et de notre reconnaissance internationale. Nous avons souhaité ajouter un prix scientifique (Etoile de l'Europe 2021) qui illustre l'excellence de nos travaux et leur connexion internationale ainsi qu'un laboratoire commun pour souligner les collaborations soutenues depuis de nombreuses années que nous entretenons avec nos partenaires du monde socio-économique. Ces choix ont été discutés collectivement au sein du thème.



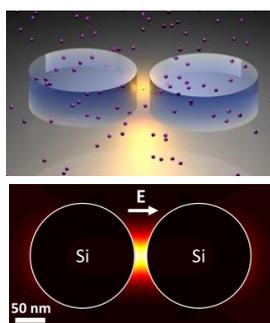
### NCO > Nanophotonique > 1

**Monographie** : Guillaume Baffou, *Thermoplasmonics: Heating Metal Nanoparticles Using Light*, Cambridge University Press (octobre 2017),

ISBN-10 : 1108418325

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01869101v1>

Ce livre est le premier dans le domaine de la plasmonique appliquée à la génération de chaleur. Rappelant les concepts de base et développant des applications précises en thérapie médicamenteuse, en enregistrement magnétique ou imagerie photo-acoustique, ce livre s'adresse à des lecteurs de divers horizons, notamment la physique, la chimie et la biologie. « *Les lecteurs de ce livre seront pleinement équipés pour entrer dans ce domaine d'activité et contribuer à son essor* », K. Alan Shore, *Optics and Photonics News*. Cette monographie illustre la contribution majeure apportée au domaine de la thermoplasmonique par l'Institut Fresnel et sa position de meneur à la pointe de la compétition internationale.

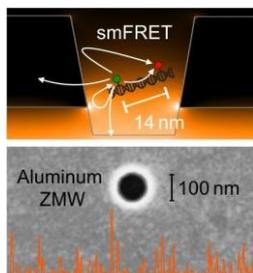


### NCO > Nanophotonique > 2

**Publication** : R. Regmi, J. Berthelot, P. M. Winkler, M. Mivelle, J. Proust, F. Bedu, I. Ozerov, T. Begou, J. Lumeau, H. Rigneault, M. F. García-Parajó, S. Bidault, J. Wenger, N. Bonod, *All-Dielectric Silicon Nanogap Antennas To Enhance the Fluorescence of Single Molecules*, *Nano Lett.* 16, 5143-5151 (2016)

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01354616v1>

Les antennes optiques plasmoniques sont intrinsèquement limitées par les pertes ohmiques dans le métal. La nanophotonique à base de silicium est une approche alternative attrayante pour mettre en œuvre des dispositifs nanophotoniques compatibles CMOS. Dans cette publication en collaboration avec ICFO et l'Institut Langevin, nous fournissons la première démonstration mondiale que les nanoantennes en silicium permettent d'obtenir des améliorations de fluorescence d'une seule molécule supérieures à 200 fois avec un volume de détection nanométrique. Ces résultats introduisent une alternative intéressante aux systèmes plasmoniques standards en or ou en argent, et innove par le design de la nanostructure permettant un renforcement intense du champ électromagnétique en-dehors du résonateur diélectrique. Ces travaux ont eu un impact important au sein du domaine et ont été cités plus de 180 fois. Ils illustrent également notre capacité à interagir au sein du thème, ce sujet mêlant nanophotonique, antennes optiques et couches minces.



### NCO > Antennes optiques et radiofréquence > 3

**Publication :** M. Baibakov, S. Patra, J.-B. Claude, A. Moreau, J. Lumeau, J. Wenger, *Extending Single-Molecule Förster Resonance Energy Transfer (FRET) Range beyond 10 Nanometers in Zero-Mode Waveguides*, ACS Nano 13, 8469-8480 (2019).

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02196579v1>

Le transfert d'énergie FRET est largement utilisé pour mesurer des dynamiques moléculaires. Cependant, le signal diminue très rapidement avec la distance entre molécules fluorescentes, et n'est généralement plus détectable au-delà de 10 nm. Ici, nous utilisons des nano-ouvertures percées dans un film d'aluminium pour surmonter cette limite. Nos structures optimisées créent des conditions favorables pour multiplier par 3 l'efficacité FRET à une grande distance inter-molécules de 14 nm où les interactions dipôle-dipôle seraient autrement trop faibles pour produire des signaux détectables. Ces travaux sont un aboutissement des recherches fondamentales menées depuis 2012 où les contributions de l'Institut Fresnel sont à la pointe des connaissances mondiales dans le domaine de nano-antennes optiques pour contrôler l'interaction dipôle-dipôle. Par ailleurs, ces travaux ont amené depuis des utilisations pratiques en biophysique moléculaire (Nucleic Acid Research 2021 et JACS 2022).



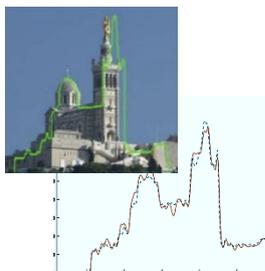
### NCO > Antennes optiques et radiofréquence > 4

**Prix scientifique :** Les étoiles de l'Europe, catégorie renouvellement pour le projet européen M-Cube coordonné par l'Institut Fresnel.

<https://www.fresnel.fr/spip/spip.php?article2641>

<http://www.mcube-project.eu/>

Lors de la 9<sup>ème</sup> cérémonie de remise des "Etoiles de l'Europe" présentée par la Ministre française de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation, Stefan ENOCH et Redha ABDEDDAIM ont reçu le Prix "Les Etoiles de l'Europe 2021" en qualité de responsables scientifiques du projet européen M-Cube, catégorie Renouvellement. Ce prix illustre le rayonnement de l'Institut Fresnel et son excellent positionnement dans des collaborations internationales avec les meilleures universités. Quelques chiffres issus du projet M-CUBE : 31 articles scientifiques, 43 actes de conférences, 33 conférences internationales invités, 11 brevets dont 1 déjà commercialisé, 2 startups créées et 1 projet FET-PROACT.



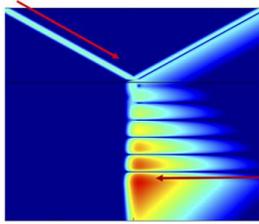
### NCO > Couches minces optiques > 5

**Publication :** J. Zideluns, F. Lemarchand, D. Arhilger, H. Hagedorn and J. Lumeau, "Automated optical monitoring wavelength selection for thin-film filters", Optics Express 29(21), 33398-33413 (2021).

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03407010>

Les travaux exposés dans cet article ont été réalisés dans le cadre de la thèse de Janis Zideluns et financés au travers d'un projet H2020 ITN (GREAT). Ces résultats sont le fruit de plusieurs années de collaborations entre l'Institut Fresnel et la société Bühler (Allemagne) et illustrent notre forte volonté de combiner recherche académique, formation des doctorants et relation avec le monde socio-

économique. Ces résultats ont également un fort impact pour la communauté puisqu'ils présentent, pour la première fois, une méthode complètement automatique pour la détermination de stratégies de dépôts de filtres optiques interférentiels complexes.



#### NCO > Couches minces optiques > 6

**Publication :** D. Niu, M. Zerrad, A. Lereu, A. Moreau, J. Lumeau, J. A. Zapien, A. Passian, V. Aubry, and C. Amra, "Excitation of Bloch Surface Waves in Zero-Admittance Multilayers for High-Sensitivity Sensor Applications", *Physical Review Applied* 13, 054064 (2020).

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02634598v1>

Les travaux présentés dans cet article ont été réalisés dans le cadre de la thèse de Dikai Niu et financés au travers de l'Automotive Motion Lab, OpenLab avec PSA Group / Stellantis. Ces résultats illustrent le lien académie/industrie, mais également l'aspect collaboration forte des activités couches minces optiques aussi bien en interne (équipes CONCEPT et RCMO) qu'en externe avec A. Passian (Oak Ridge National Laboratory) et J. Zapien (City University of Hong Kong). Les résultats de cet article montrent en particulier le potentiel des structures multi-diélectriques pour générer des ondes de Bloch de surfaces pour des applications capteurs, mais également notre capacité en termes de synthèse, fabrication et caractérisation de composants en couches minces optiques.



#### NCO > Interaction laser-matière aux forts flux > 7

**Laboratoire Commun : Laboratoire Optique Lasers et Hyperfréquences (LOLaH) - CEA**

<https://www.fresnel.fr/spip/spip.php?rubrique30>

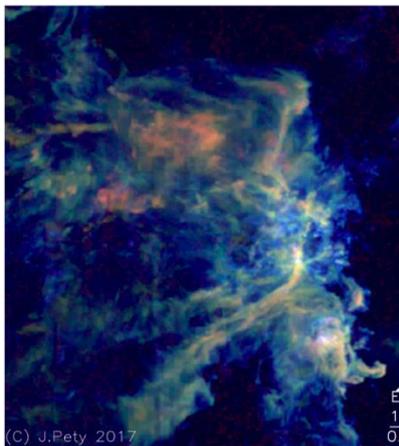
Fort d'une collaboration réussie depuis des années 1990, l'Institut Fresnel et le CEA ont décidé de donner à ce solide partenariat un cadre fonctionnel au travers d'un laboratoire commun inauguré en mars 2020. Ce programme de recherche ambitieux comporte des engagements humains, matériels et financiers. 30 personnes y sont activement impliquées. Les thématiques s'articulent autour de 8 axes bien identifiés (résistance des composants optiques aux faisceaux laser de puissance, impact de la contamination, procédés de réparation, composants diffractifs, matériaux pour les applications optiques et hyperfréquence, modélisation de la diffraction, découpe laser, chauffage laser). Parmi nos réalisations récentes, nous avons notamment conçu des lames quart d'onde intégralement en silice nanostructurée pour des applications laser de haute puissance (publication *Optica* 2021). Sur la période d'évaluation, 4 thèses communes ont été soutenues et 2 sont en cours.

## Thème n°3 – Information et Photonique (I&P)

Le thème Information & Photonique est constitué de 4 thématiques distinctes : télédétection, traitement de l'information et applications, communications optiques pour l'IoT et milieux désordonnés. Le présent document propose 7 faits et activités marquants sélectionnés de manière à être représentatif de ces 4 axes.

Ainsi, nous avons dans un premier temps sélectionné 5 productions scientifiques représentatives de notre niveau d'expertise et de son positionnement : 1 monographie centrée sur la diffusion lumineuse dans les couches minces optiques publiée à l'international ainsi que 4 publications dont les résultats ont été remarquables pour les communautés qu'ils adressent. Ces derniers concernent la tomographie par impédance électrique pour la sûreté nucléaire avec un travail qui a été récompensé par 2 prix, l'aide au diagnostic de la maladie d'Alzheimer couplant traitement des données et intelligence artificielle, la spectroscopie astronomique dont les travaux ont fait l'objet d'un fait marquant du CNRS suite à la publication simultanée de 3 articles, et la microscopie super-résolue avec l'édition et la mise à disposition en ligne d'un logiciel original de plusieurs dizaines de milliers de lignes de code.

Deux faits marquants ont également été choisis car ils illustrent la reconnaissance internationale de notre niveau d'expertise à savoir le portage et la coordination de 2 projets européens H2020, ainsi que l'intégration, sur sollicitation, du consortium international LISA pour la détection des ondes gravitationnelles.



### I&P > Télédétection >1

#### Publication :

A. Roueff, et al., *C18O, 13CO, and 12CO abundances and excitation temperatures in the Orion B molecular cloud: Analysis of the achievable precision in modeling spectral lines within the approximation of the local thermodynamic equilibrium*, *Astronomy & Astrophysics*, 645, A26 (2021)

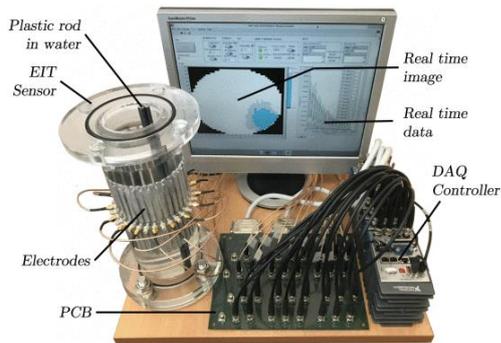
DOI : [10.1051/0004-6361/202037776](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202037776) (open access)

<https://www.cnrs.fr/fr/machine-learning-une-percee-pour-letude-des-pouponnieres-detoiles>

Le processus de formation des étoiles s'accomplit dans des nuages moléculaires géants et peut être analysé grâce à des observations moléculaires de très haute résolution spectrale au sein de ces environnements. L'association des hautes résolutions spatiale et spectrale dans ces observations millimétriques conduit à des jeux de données énormes (typiquement un million de pixels avec plus de 200000 canaux par pixel entre 86 et 116 GHz) pour lesquelles des approches statistiques, encore peu utilisées dans ce domaine, apportent une méthodologie permettant de tirer parti de ces masses de données exceptionnelles.

Dans l'article cité ci-dessus, nous avons montré que la borne de Cramer Rao permet de quantifier rigoureusement les précisions d'estimation en fonction des conditions physiques. Cette approche a permis de caractériser les abondances de plusieurs isotopes du monoxyde de carbone (CO), remettant en cause les hypothèses courantes d'interpréter l'excitation des différents isotopes de la molécule CO par une même température. De plus, nous avons aussi montré qu'il était possible de contraindre la précision des résultats par de nouvelles observations. Ce dernier résultat nous a permis de justifier de nouvelles demandes de temps d'observation avec le télescope de 30 mètres de l'IRAM. Celles-ci ont été attribuées, puis réalisées en novembre 2021.

Cet article a fait partie d'une série de 3 articles publiés dans la revue *Astronomy & Astrophysics* en janvier 2021, qui ont également fait l'objet d'un communiqué sur le site du CNRS.



## I&P > Traitement de l'information & applications > 2

### Publication / Rupture technologique :

M. Darnajou et al., *High Speed EIT With Multifrequency Excitation Using FPGA and Response Analysis Using FDM*, in IEEE Sensors Journal, vol. 20, no. 15 (2020).

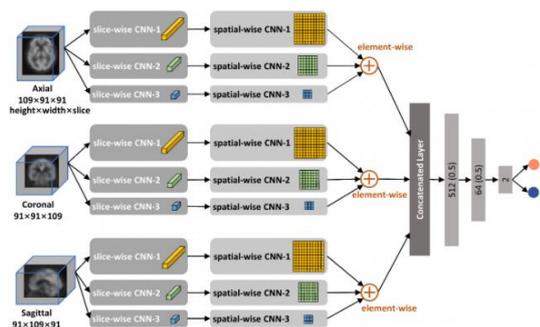
DOI : [10.1109/jsen.2020.2984388](https://doi.org/10.1109/jsen.2020.2984388)  
[10.3390/s19173679](https://doi.org/10.3390/s19173679)

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03370804>

Nos travaux sur la tomographie par impédance électrique ont permis de développer et créer un nouveau dispositif ultra-rapide 100 fois plus rapide que ceux de l'état de l'art. Ce nouveau dispositif améliore nettement l'instrumentation pour la sûreté des réacteurs nucléaires et pour d'autres domaines d'application : mine, pétrole, chimie, agroalimentaire et imagerie médicale.

Ce travail a été reconnu par la communauté internationale comme en témoigne l'article publié par la revue *Review of Scientific Instruments* concernant l'impact des FPGA sur l'instrumentation scientifique (<https://aip.scitation.org/doi/10.1063/5.0050999>), où nos résultats sont mis explicitement en exergue.

Ces travaux ont été récompensés par le prix de la Région SUD (innovation), le prix de thèse Centrale Innovation 2021 pour Mathieu Darnajou, un prix SFEN Innovation Technologique 2021, et ils ont permis la création d'une start-up ITIE (Imagerie par Tomographie d'impédance Electrique) soutenue par le CEA et l'incubateur public IMPULSE.



## I&P > Traitement de l'information & applications > 3

### Publication :

X. Pan et al., *Multi-View Separable Pyramid Network for AD Prediction at MCI Stage by 18 F-FDG Brain PET Imaging*, IEEE Transactions on Medical Imaging, 40 (2021)

DOI : [10.1109/TMI.2020.3022591](https://doi.org/10.1109/TMI.2020.3022591)  
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03627176v1>

La Maladie d'Alzheimer (MA) est l'une des maladies neurodégénératives les plus répandues dans le monde. Une des difficultés majeures actuelles est d'identifier, parmi les sujets atteints de Trouble Cognitif Léger (TCL), ceux qui dans le temps vont développer une démence de type MA.

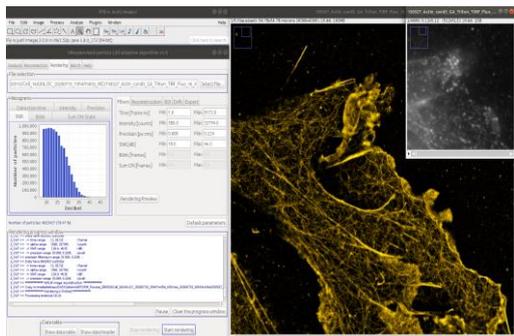
La Tomographie par Emission de Positons (TEP) au 18 Fluoro-Deoxy-Glucose est une modalité d'imagerie moléculaire qui contribue au diagnostic précoce de cette maladie, en mesurant la consommation de Glucose des régions anatomiques du cerveau.

L'aide au diagnostic assistée par ordinateur que nous avons développée permet de répondre à ce défi, à partir de l'analyse d'une image TEP du sujet. A cet effet, un Réseau de Neurones Convolutif (CNN) 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 CNN.

Ce travail est issu d'une collaboration rapprochée interdisciplinaire entre imagerie médicale (équipe IMOTHEP) et approches numériques avancées (GSM).

## I&P > Traitement de l'information & applications > 4



### Publication / Logiciel :

S. Maifert, J. Touvier, L. Benyoussef, R. Fabre, A. Rabaoui, M.-C. Blache, Y. Hamon, S. Brustlein, S. Monneret, D. Marguet and N. Bertaux, "A Theoretical High-Density Nanoscopy Study Leads to the Design of UNLOC, a Parameter-free Algorithm," *Biophysical Journal*, 115 (2018).

DOI : [10.1016/j.bpj.2018.06.024](https://doi.org/10.1016/j.bpj.2018.06.024) (open access)

<http://www.ciml.univ-mrs.fr/fr/technologie/imagimm/software>s

La microscopie par localisation de molécules uniques (SMLM) permet après traitement d'obtenir des images à très haute résolution. Cette technique suscite de grands espoirs et de nombreux travaux de recherche lui sont consacrés. Cependant, dans le cas de hautes densités de particules, la caractérisation de la précision et de la robustesse des images reconstruites s'avère difficile.

Dans cet article, nous avons proposé une étude théorique permettant de prédire la précision de localisation des particules sur des données expérimentales, en collaboration avec le CIML avec qui nous travaillons depuis de nombreuses années. En parallèle, nous avons également développé un nouvel algorithme (UNLOC) rapide, robuste et non supervisé pour la localisation de particules et adapté aux hautes densités de particules.

De plus, ce logiciel UNLOC est disponible gratuitement sous forme de plugin *ImageJ*, pour un usage académique et à but non lucratif.



## I&P > Communications optiques pour l'IoT > 5

### Coordination de réseaux européens :

Projet H2020 ITN MSCA (VisioN)

Action COST H2020 (NEWFOCUS)

<https://www.vision-itn.eu/>

<https://www.newfocus-cost.eu/>

Les projets européens VisioN et NEWFOCUS, tous deux portés par l'Institut Fresnel, ont pour objectif la création et la coordination de réseaux scientifiques. Ils ont permis de générer des activités riches en collaborations, en visite de laboratoires et échanges de doctorants, en organisation de workshops, conférences, séminaires, et en productions scientifiques.

Le projet VisioN a en effet été un projet d'envergure sur la technologie émergente LiFi, regroupant des acteurs académiques et industriels majeurs dans le domaine. Il a déjà produit un nombre important de résultats (dont plus de 35 articles de revue et plus de 55 actes de conférence), pour un budget total de 3.75 M€ sur la période 2017-2022.

L'Action COST NEWFOCUS réunit de son côté plus de 100 partenaires académiques et industriels de 36 pays, et porte sur l'intégration des solutions à base du LiFi dans les futurs environnements intelligents et les prochaines générations des réseaux sans-fil (5G+/6G).



## I&P > Milieux désordonnés > 6

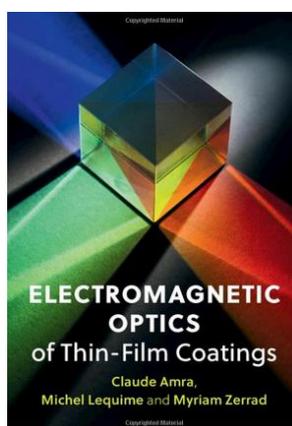
### Instrumentation extrême et positionnement international :

Intégration du Consortium LISA - vers les prochaines générations de détecteurs d'ondes gravitationnelles

<https://www.fresnel.fr/spip/spip.php?article2229>

La détection des ondes gravitationnelles est étroitement liée aux performances des miroirs multi-diélectriques constituant la cavité des interféromètres géants (plusieurs km). Ceci explique l'intensité des efforts déployés pour franchir la barrière du ppm (1ppm =  $10^{-6}$  du flux incident) dans le bilan des pertes optiques (absorption et diffusion) des miroirs. A titre d'illustration, une rugosité d'une fraction de nanomètre aux interfaces du miroir suffit pour masquer l'information utile dans la communication inter-satellites (cas du projet LISA), ou pour réduire l'extension artificielle des bras de l'interféromètre (cas du projet VIRGO). Dans ce contexte ultra-compétitif où de nombreux pays et agences sont engagés (ESA, NASA, CNES), nous avons répondu à plusieurs challenges scientifiques sur le thème de la modélisation et de la métrologie de la diffusion lumineuse, avec le soutien inconditionnel du CNES en particulier. La modélisation a concerné majoritairement la quantité de lumière piégée par diffusion dans les composants, tandis que la métrologie a été activement consacrée à l'analyse du speckle rétrodiffusé. Ces travaux nous ont amenés, sur sollicitation et après validation par l'ESA, à intégrer le consortium du LISA en 2018 pour y prendre en charge les problématiques de lumière diffusée au niveau des composants.

On notera que LISA est la prochaine génération de détecteurs d'ondes gravitationnelles. L'interféromètre stellaire triangulaire présentera des bras de 2,5 millions de km et la diffusion lumineuse est déjà identifiée comme la limitation majeure des performances de l'instrument. Le consortium compte plus de 70 groupes répartis en Europe et aux USA.



## I&P > Milieux désordonnés > 7

### Monographie :

Claude Amra, Michel Lequime, Myriam Zerrad. *Electromagnetic Optics of Thin-Film Coatings: Light Scattering, Giant Field Enhancement, and Planar Microcavities*. Cambridge University Press, 2020,

ISBN 9781108772372

DOI [10.1017/9781108772372](https://doi.org/10.1017/9781108772372).

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03102706>

Cette monographie (373 pages) est consacrée à l'étude théorique des filtres interférentiels constitués d'empilements de couches minces optiques, et de la manière dont ils peuvent être efficacement exploités pour des applications traditionnelles et innovantes. Après un rappel des fondamentaux de l'optique électromagnétique, les propriétés des systèmes multicouches sont introduites en appui sur une double transformation de Fourier des équations de Maxwell.

Cette approche permet d'analyser en détail le sujet des exaltations géantes dans les empilements diélectriques, et de la diffusion de la lumière par les rugosités aléatoires aux interfaces de ces composants. On établit le lien entre la réflexion totale et l'optique guidée, avant d'aborder le thème des microcavités luminescentes. Enfin, on tient compte de la lumière piégée se propageant sous forme de modes électromagnétiques dans les composants.

Ce livre est à l'attention des chercheurs, ingénieurs et étudiants intéressés par la nano-photonique, les télécommunications optiques, l'astronomie d'observation, les optiques pour le spatial et la détection des ondes gravitationnelles.

## Thème n°4 – Imagerie (IM)

Le thème imagerie s'articule autour des 4 sous-thèmes suivants : approches numériques, instrumentation, biologie et médical. Le portfolio présente 7 faits et activités sélectionnés dans ces sous-thèmes.

Concernant les approches numériques, nous présentons une publication sur l'imagerie super-résolue et le financement récemment obtenu Equipex IDEC « imagerie et détection computationnelles », structurant un rapprochement entre les sous-thèmes numériques et instrumentation. Autour de l'instrumentation, nous présentons une publication sur la ptychographie vectorielle ainsi que l'attribution de la médaille d'argent à l'un des membres du thème. En biologie, nous présentons une publication sur un constituant encore mal connu du cytosquelette : les septines. En biomédical, nous présentons l'activité en histologie Raman Cohérent, domaine actif de recherche à l'IF et point de départ d'une startup récemment créée, ainsi que le développement d'un dispositif préclinique pour le traitement du glioblastome.



### IM > Approches numériques > 1

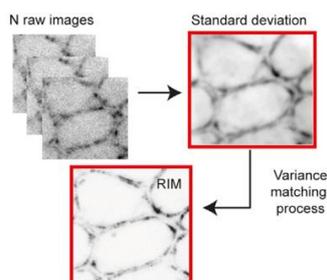
#### Financement PIA 3 Equipements Structurants pour la Recherche (ESR / EquipEx+) (2.3 M€ Institut Fresnel)

Projet Equipex+ IDEC « imagerie et détection computationnelles »

<https://www.fresnel.fr/spip/spip.php?article2556>

Le projet Equipex+ IDEC « imagerie et détection computationnelles », démarré en 2021, a pour objectif de développer la prochaine génération de systèmes d'imagerie basée sur une co-conception matériel-logiciel. Dans ce cadre nous développons de nouveaux dispositifs dont la particularité est qu'ils placent les approches numériques au cœur du processus d'imagerie. Les équipements développés intégreront la plateforme Photonique labellisée 'plateforme technologique AMU'. Un exemple de tels dispositifs concerne la microscopie adaptative, illustrant parfaitement ce rapprochement entre instrumentation, sciences numériques et biologie : Un microscope "intelligent" est conçu pour adapter automatiquement son schéma de balayage à la morphologie des tissus biologiques par une recherche algorithmique des voxels informatifs. Cet instrument a permis une réduction de la dose lumineuse d'un facteur proche de 100, sans perte de résolution lors de l'imagerie de tissus en développement chez la Drosophile. [Référence : Abouakil et al. (2021) : [An adaptive microscope for the imaging of biological surfaces](#). *Light: Science & Applications*]]. Ce dispositif fait également l'objet de deux brevets.

L'objectif des instruments développés dans le projet IDEC et d'offrir aux utilisateurs des instruments innovants hybridant imagerie-caractérisation et numérique, n'existant pas sur le marché ni sur les plateformes à l'échelle internationale. Ces instruments ont suivi une trajectoire depuis la conception innovante par les chercheurs à une maturité suffisante pour l'utilisation par une large communauté de disciplines variées, depuis la biologie jusque l'astrophysique. Ces instruments sont issus de collaborations rapprochées, à l'institut Fresnel, entre sciences du numériques et modélisation (thèmes Information et Photonique et Modélisation Electromagnétique) et instrumentation (thèmes Nanophotonique et Composants, et Imagerie). Ce projet couvre donc les quatre thèmes et quatre équipes de l'institut Fresnel (MOSAIC, HIPE, CONCEPT, SEMO).



### IM > Approches numériques > 2

**Publication :** T. Mangeat, S. Labouesse, M. Allain, A. Sentenac, *Super-resolved live-cell imaging using random illumination microscopy*, *Cell reports methods* (2021)

<https://doi.org/10.1016/j.crmeth.2021.100009>

Les microscopes optiques super-résolu ont contribué aux progrès rapides de la biologie cellulaire. Cependant, malgré l'existence de coûteux systèmes clé en main, l'expertise instrumentale et/ou numérique, et les contraintes sur les échantillons, nécessaires à leur bon fonctionnement limitent leur utilisation de routine. Avec le CBI Toulouse et le LS2N Nantes, nous avons développé un microscope (Random Illumination Microscopy ou

RIM) simple de mise en œuvre et d'utilisation qui a pour but de démocratiser l'accès à la super-résolution. RIM consiste à enregistrer une centaine d'images de l'échantillon sous divers éclairagements aléatoires (tavelures) et à utiliser leur statistique pour former une image super-résolue. Il permet un gain de résolution comparable aux techniques à éclairage structuré (SIM) mais sans contrôle des illuminations. Sa robustesse aux aberrations, sa faible toxicité et sa bonne résolution temporelle lui a permis d'imager des tissus vivants dans des conditions inaccessibles à SIM. L'importance de ce travail a été soulignée dans une revue récente sur la super-résolution (prakash 21). Ce travail est une illustration de la capacité des approches conceptuelles et numériques avancées de l'institut Fresnel de s'appliquer à des contextes d'imagerie contraignante dans des problématiques concrètes posées par la biologie.

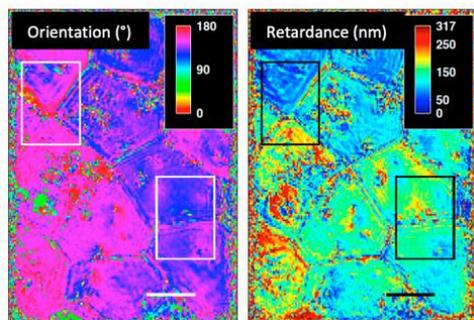


### IM > Instrumentation > 3

#### Fait marquant :

Médaille d'argent du CNRS décernée à Sophie Brasselet (octobre 2016)

Le jeudi 27 octobre 2016, Jean Yves Marzin directeur de l'INSIS a remis la médaille d'argent à Sophie Brasselet. Cette médaille récompense l'originalité, la qualité et l'importance de ses travaux dans le domaine de l'imagerie pour la biologie. Sophie Brasselet exploite la polarisation de la lumière pour imager à l'échelle moléculaire l'organisation orientationnelle de bio-molécules dans des assemblages et milieux complexes. Ces approches ont été déployées dans des contextes très variés de l'optique non-linéaire à l'imagerie de fluorescence super-résolue, pour les nanosciences et les sciences du vivant, abordant de pair les questions de modélisation et d'instrumentation. Elles sont aujourd'hui utilisées par les biologistes dans les contextes de l'organisation des lipides dans les gaines neuronales, de l'actine dans le cortex des cellules et des tissus, et sont envisagées pour suivre les changements conformationnels de protéines membranaires. Ces travaux ont mené à plus de 130 publications et de nombreuses collaborations avec des biologistes de la biologie moléculaire, cellulaire et du développement.



### IM > Instrumentation > 4

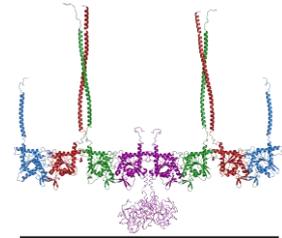
#### Publication :

P. Ferrand, A. Baroni, M. Allain and V. Chamard, *Quantitative imaging of anisotropic material properties with vectorial ptychography*, *Optics Letter* (2018). DOI: 10.1364/OL.43.000763

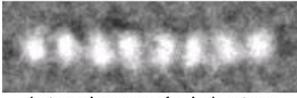
<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01653296/document>

La ptychographie vectorielle, une nouvelle méthode de microscopie développée à l'Institut Fresnel à partir de 2015, permet de révéler les propriétés anisotropes des matériaux en produisant une cartographie spatiale de la matrice de Jones. Basée sur l'inversion numérique de clichés d'intensité et le développement d'un formalisme vectoriel du champ diffracté, cette méthode de microscopie est utilisée pour la première fois dans cet article pour accéder aux paramètres optiques d'un cristal biogénique anisotrope. Ainsi, la transmittance, la retardance, la différence de chemin optique et l'orientation de l'axe rapide sont quantifiés spatialement. Cette approche a permis de confronter le cristal biogénique à son modèle synthétique, dans le cadre de nos travaux sur la biominéralisation. Cette thématique est soutenue par 2 financements ERC (3DBioMat, sur la formation des biominéraux calcaires et TexTOM, sur la structure mécanique de l'enthèse). Elle implique plusieurs autres microscopies innovantes de l'Institut Fresnel, comme le Raman cohérent, la ptychographie de Bragg et la tomographie de texture, en rayons X.

molecular model of a human septin octamer



32 nm



electron microscopy of a single octamer

## IM > Biologie > 5

### Publication :

F. Iv, C. Silva Martins, G. Castro-Linares, C. Taveneau, P. Barbier, P. Verdier-Pinard, L. Camoin, S. Audebert, F.-C. Tsai, L. Ramond, A. Llewellyn, M. Belhabib, K.i Nakazawa, ADi Cicco, R. Vincentelli, J. Wenger, S. Cabantous, G. Koenderink, A. Bertin, M. Mavrakis<sup>1</sup>, (nsights into animal septins using recombinant human septin octamers with distinct SEPT9 isoforms, **Journal of Cell Science**, Company of Biologists, 134 (15) (2021).

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03119193/document>

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. Malgré leurs rôles essentiels, notamment dans plusieurs pathologies humaines, la façon dont les septines humaines s'organisent et fonctionnent dans les cellules reste mal comprise. Un travail coordonné par Manos Mavrakis, a permis d'isoler pour la première fois des complexes hétérooctamériques recombinants de septines humaines contenant un isoforme de la septine : Sept9. Ce tour de force technique ouvre la voie à une meilleure compréhension des mécanismes de régulation de cet élément essentiel du cytosquelette. Ce travail pluridisciplinaire illustre parfaitement la synergie née de l'arrivée de biologistes à l'Institut Fresnel.

LIGHTCORE  
technologies

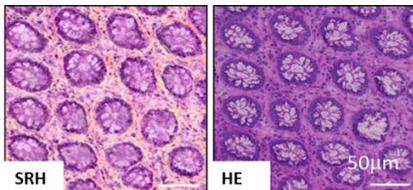
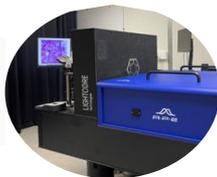


Image SRH (stimulated Raman histology) et histoloaiaue (HE – hematoxvline et Eosine).

## IM > Biomédical > 6

### Création d'une startup :

<https://lightcore.tech>

<https://www.youtube.com/watch?v=2K56Yl3Onf0>

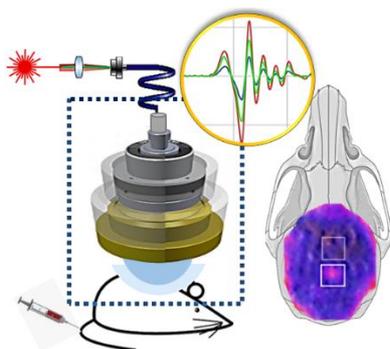
### Publication reliée :

B. Sarrì *et al.*, *Stimulated Raman histology: one to one comparison with standard hematoxylin and eosin staining*, *Biomed. Opt. Express* (2019).

<https://doi.org/10.1364/BOE.10.005378>

Nous avons développé une approche utilisant l'imagerie Raman cohérente (SRS – Stimulated Raman scattering) pour visualiser la morphologie des tissus et en déterminer leur caractère cancéreux. Cette nouvelle approche dénommée 'Histologie Raman Stimulée – Stimulated Raman Histology) (SRH) apporte en moins de 2 minutes un rendu similaire à l'histologie classique qui prend entre 40 minutes et 24 heures. Nous évaluons la technologie SRH en collaboration avec les chirurgiens et anatomo-pathologistes de l'Institut Paoli-Calmettes pour les cancers gastriques et avec l'hôpital de la Timone pour les cancers du cerveau.

La technique SRH est valorisée par le société Lightcore Technologies (spinoff de l'Institut Fresnel - <https://lightcore.tech/> depuis 2019), à travers un microscope SRS dédié réalisant une coloration virtuelle histologique SRH (image ci-dessous). Ce microscope dispose d'une source laser originale développée à façon permettant d'imager deux liaisons chimiques simultanément.



## IM > Biomédical > 7

### Publication :

K. Metwally, C. Bastiancich, F. Correard, A. Novell, S. Fernandez, B. Guillet, B. Larrat, S. Mensah, M.-A. Estève, A. Da Silva, *Development of a multifunctional preclinical device for the treatment of glioblastoma*, Biomedical Optics Express 12(4), 2021.

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03248327>

Le glioblastome multiforme (GBM) est l'une des tumeurs cérébrales malignes les plus fréquentes et les plus agressives chez l'adulte. Le traitement du GBM est limité par la barrière hémato-encéphalique (BHE), qui limite la diffusion d'agents thérapeutiques (chimiothérapie). Parmi les thérapies expérimentales, la thérapie photothermique, exaltée par l'utilisation de nanoparticules, est une stratégie prometteuse. Nous avons développé un dispositif préclinique intégré polyvalent capable d'effectuer : i) une perméabilisation de la BHE par sonication ultrasonore focalisée (FUS) ; ii) un traitement photothermique à l'aide d'un laser continu (830 nm, 2W) ; iii) une évaluation en temps réel de l'efficacité du traitement grâce un suivi *in situ* de la température par mesures photoacoustiques. Des expériences préliminaires *in vivo* sous-cutanées et transcrâniennes ont été menées sur des souris saines et porteuses de tumeurs. La perméabilisation de la BHE induite par le FUS transcrânien a été validée par tomographie par émission monophotonique (TEMP). Les résultats illustrent les possibilités thérapeutiques et l'intérêt d'un tel dispositif intégré comme outil de validation de futurs traitements.

Ces travaux s'inscrivent dans un projet collaboratif entre l'Institut Fresnel, le LMA, l'INP, le LP3 et le CERIMED à Marseille ainsi que le CEA-Neurospin (Gif-sur-Yvette), "Glioblastoma Risk Attrition by Vectorized ThermoTherapy-GRAVITY", ITMO "Plan Cancer 2014-2019" INSERM program (PC201613).

## **ANNEXES**

**Annexe 1 - Projet - Institut Fresnel**

**Annexe 2 - Plan de Continuité d'Activité - Institut Fresnel**

**Annexe 3 - Plateformes labellisées - Institut Fresnel**

**Annexe 4 - Laboratoires Communs - Institut Fresnel**

## **ANNEXE 1**

### **PROJET INSTITUT FRESNEL**

## PROJET DE RECHERCHE INSTITUT FRESNEL

AVRIL 2022

Le projet scientifique de l'Institut Fresnel vise à maintenir sa position de haut niveau, à l'échelle internationale, dans ses domaines matures portés par les quatre thèmes, tout en explorant des directions émergentes dans lesquelles la compétition est parfois importante. Certains domaines sont d'ores et déjà soutenus par des financements conséquents (Equipex+, projets européens) ou des implications significatives (Instituts d'établissements, PEPR, projets de formation aux échelles internationale ou nationale), ou encore par des soutiens RH CDDs. Les directions scientifiques sont réfléchies au sein des thèmes, impliquant souvent des contributions collectives dans lesquelles des chercheurs de compétences très complémentaires sont impliqués autour d'approches théoriques, numériques ou instrumentales. Certains de ces projets impliquent les personnels techniques services communs de l'unité de manière significatives, et/ou ont pour objectif l'incorporation de nouveaux outils, uniques à l'échelle internationale, dans les plateformes et les plateaux techniques. Les grandes lignes scientifiques du projet de l'Institut Fresnel sont déclinées par thèmes dans les parties qui suivent.

**NB : dans les parties les références citées utilisent les numéros de citation du fichier excel « 2-hceres-vague-c-der-donnees\_de\_production\_et\_dactivites », onglet « 1-JOURNAUX REVUES ».**

### Thème n°1 – Modélisation Electromagnétique

Les activités de modélisation électromagnétique de l'Institut Fresnel pourront bénéficier de nouvelles opportunités au cours des prochaines années. Le recrutement d'un enseignant-chercheur ou d'un chercheur pour développer des activités de recherche transverses dans le thème est une priorité de l'Institut Fresnel. Au niveau du site d'Aix-Marseille, la mise en place de l'Institut Archimède en mathématique et informatique apporte de nouvelles ressources et de nouvelles collaborations (laboratoires I2M et CPT) aux activités de mathématiques appliquées de l'Institut Fresnel. Les membres du thème participent également aux « journées des théoriciens marseillais » qui rassemblent les enseignant·es-chercheur·es et les chercheur·es effectuant des activités théoriques en physique, chimie, nanoscience et sciences pour l'ingénieur du site d'Aix-Marseille. Dans ce cadre, le thème modélisation électromagnétique réalise des démarches pour fédérer plusieurs laboratoires du site dans le but d'acquérir un équipement de calcul haute performance spécifique aux activités de modélisation numérique dans nos disciplines. Au niveau national, les équipes de modélisation électromagnétique de l'Institut Fresnel ont manifesté leur intérêt pour prendre part au PEPR Electronique. A l'international, le partenariat privilégié avec le « Centre for plasmonics and metamaterials » de l'Imperial College London pourra être renforcé avec l'apport de contrats doctoraux par l'Université d'Aix-Marseille.

Les activités de modélisation théoriques des systèmes dispersifs et des structures périodiques ont été renforcées avec le recrutement en 2018 de Maxence Cassier, mathématicien appliqué, comme chargé de recherche au CNRS. Les nouvelles connaissances en théorie spectrale et en théorie des fonctions de Herglotz seront exploitées afin de proposer des modèles originaux reposant sur la dispersion en fréquence ou spatiale pour étudier les propriétés des matériaux composites et des structures périodiques [Gra18, Gra20]. Des travaux seront également effectués pour proposer des preuves rigoureuses de développement sur les modes quasi-normaux (ou QNM) ou également sur l'étude des isolants topologiques (existence de points de Dirac et d'états protégés), qui constituent encore des terrains encore largement inexplorés du point de vue de leur compréhension mathématique. Des collaborations sont engagées avec Graeme Milton de l'université de l'Utah à Salt-Lake City pour la modélisation des capes d'invisibilité au moyen des fonctions de Herglotz [Cas17c : <https://arxiv.org/abs/1610.08592>] et avec Michael Weinstein de l'université de Columbia à New York pour l'étude mathématique des isolants topologiques [Cas21b]. Enfin, les modes électromagnétiques analogues aux ondes de trou noir seront étudiées sous plusieurs angles : propriétés mathématiques, étude du phénomène physique associé, impact sur la convergence des méthodes numériques et application à la modélisation de la pointe du microscope de champ proche optique (SNOM) de l'équipe RCMO de l'Institut Fresnel.

Du point de vue du numérique et du calcul haute performance, nous avons déjà commencé à utiliser le Mesocentre AMU – le centre de calcul intensif du site d'Aix-Marseille – et cette pratique sera renforcée. Il faut noter que plusieurs codes utilisés dans ce thème reposent sur des bibliothèques de calcul haute performance

qui peuvent être compilées sur n'importe quelle machine. Pour cela, l'arrivée en 2019 à l'Institut Fresnel de Gérard Henry, ingénieur CNRS spécialiste des architectures haute performance, est un atout décisif pour permettre une grande fluidité de fonctionnement avec le *Mesocentre AMU*. Nous prévoyons par exemple d'adapter les méthodes de décomposition de domaine existantes pour traiter des structures photoniques de plus grandes dimensions. D'autre part, il sera important de disposer de méthodes d'optimisation modernes (optimisation topologique).

Nous constatons par ailleurs en modélisation nanophotonique des intérêts grandissants poussés par les progrès technologiques importants réalisés ces dernières années en termes de techniques de fabrication, de caractérisation et ou bandes de fréquences accessibles (moyen infrarouge). Un bon exemple de cela est la maîtrise de dépôt de matériaux non-linéaires et leur gravure qui permet d'envisager des designs jusqu'alors impensables. Autre exemple, les matériaux dits "2D" comme les feuillets mono-atomiques de graphène présentent de la dispersion en fréquence, de l'anisotropie et des non-linéarités qui sont désormais étudiées expérimentalement et qui doivent pouvoir être modélisées rigoureusement et efficacement. Enfin, la prise en compte des non-linéarités spatiales dans les guides d'onde peut conduire à de nouveaux dispositifs ou fonctionnalités comme cela a été le cas avec l'utilisation des profils spatiaux en régime linéaire dans les fibres optiques.

Le plateau technique microonde va faire l'objet d'une rénovation importante (financement Equipex+ IDEC de positionneurs 3D) lui donnant des capacités uniques. Nos projets en analogie microondes s'orienteront vers : i) la modélisation et l'étude expérimentale d'objets circumstellaires (partenariat dans le cadre du projet ERC Adv Grant Dust2Planet) ; ii) l'étude de petits corps du système solaires ; et iii) la réalisation d'« optimal designs » (tests effectués sur des structures réelles).

Les travaux en nanophotonique non-linéaire seront poursuivis. Après avoir largement exploré les possibilités offertes par les réseaux résonnants en cavité (CRIGF) structurés dans une seule direction, l'objectif est d'étendre notre étude aux CRIGF structurés dans deux directions. Cela permettrait d'utiliser le cristal non linéaire (Niobate de Lithium) dans une orientation permettant un accord de phase entre un mode guidé TM à la fréquence pompe et un mode guidé TE à la fréquence harmonique et de profiter d'une deuxième direction de confinement du champ. Pour surmonter la difficulté numérique associée à l'aspect multi-échelle et fortement résonnant des CRIGF, des techniques numériques avancées seront mises en œuvre (d'une part décomposition de domaine pour la méthode des éléments finis, et d'autre part techniques d'intelligence artificielle).

L'étude des structures périodiques et des métamatériaux spatio-temporels, c'est-à-dire avec une permittivité dépendant de l'espace et du temps, est un sujet de recherche qui se développe très rapidement. Les recherches engagées à l'Institut Fresnel [Hui19] seront poursuivies en collaboration avec Sébastien Guenneau, directeur de recherche au CNRS affecté depuis octobre 2019 à Imperial College à Londres. Les connaissances de l'Institut Fresnel pourront notamment être exploitées pour étudier le cadre physique des matériaux spatio-temporels (dispersion, causalité) et caractériser finement les nouvelles propriétés de ces structures spatio-temporelles.

## Thème n°2 – Nanophotonique et Composants

Au niveau global du thème, nous nous emploierons à multiplier les interactions entre les différentes directions de recherche scientifique et technologique pour favoriser les échanges. Les opportunités d'interactions avec les autres thèmes sont également nombreuses et prometteuses d'innovations, nous veillerons à les stimuler au travers d'échanges, séminaires et projets communs. Après discussions au sein du thème, nous avons identifié deux profils distincts pour palier nos besoins actuels en recrutement. Le premier concerne un profil MCF 30/63/61 autour de la nanophotonique et des composants avancés que nous souhaitons mettre en avant. L'arrivée d'un(e) nouveau enseignant-chercheur est important pour dynamiser l'activité et contre-balancer plus de deux départs à la retraite dans les années 2022-2023. Par ailleurs, suite à un départ en mobilité, la plateforme de l'Espace Photonique est très déficitaire en personnel technique. Pour assurer le bon maintien et développement de l'activité couches minces, nous avons besoin d'un recrutement d'un(e) ingénieur d'étude ou de recherche BAP C sur les nano-composants optiques.

### Nanophotonique

Les perspectives d'avenir pour les aspects fondamentaux en mécanique quantique concernent la conception de nouveaux tests de la théorie quantique (par exemple, test des limites du principe de superposition et/ou de la transition classique-quantique pour des objets massifs-nanorésonateurs, microsphères en lévitation optique) dans des régimes de pointe en matière de métrologie (décohérence minimale permise par des conditions de vide et de température extrêmes). Nous étudierons également le couplage fort en régime quantique (via la fonction d'onde du photon par exemple) ainsi que les fonctions de Green quantiques au-delà de l'approximation dipolaire.

En absorption et diffusion linéaire et non-linéaire de nanostructures, une partie des travaux futurs consistera à optimiser les sensibilités et les spécificités afin de contrôler plus précisément les interactions lumière matière. Les études devraient se porter majoritairement vers les applications physico-chimiques avec des capteurs plus efficaces ou vers la biologie avec une métrologie de la température en routine. D'un point de vue plus fondamental, l'étude de la nano structuration des liquides grâce à la diffusion non linéaire devrait consolider des collaborations avec l'Institut Lumière Matière ou l'Institut Néel.

Les perspectives de recherche concernant les nanostructures diélectriques et théories modales sont vastes, nous allons axer nos efforts vers le développement de méthodes numériques pour optimiser les champs internes et champs proches. Le couplage de sources de photons à l'intérieur des structures où le champ et la densité d'états sont les plus forts sera également un objectif important. Les analyses modales nous aideront à comprendre les réponses temporelles de ces cavités photoniques. Nous nous intéresserons aux limites d'absorption et de diffusion et étudierons les structures diélectriques capables d'absorber efficacement le rayonnement électromagnétique. De même qu'il nous avait permis de simuler efficacement des filtres multicouches entre fibres monomodes par un calcul fortement multimodal dans les couches, le calcul modal avec propagation simulée par matrice  $S$  permettra la simulation de filtres hybrides composés de filtres multicouches en bout de réseau de Bragg.

### **Antennes optiques et radiofréquences**

Pour les nanoantennes optiques, une partie des travaux futurs consistera à appliquer la méthodologie des nanoantennes et nano-ouvertures plasmoniques à des problématiques de biologie moléculaire sur des interactions entre protéines et ADN. Ces études tireront profit des excellentes résolutions temporelles et des forts signaux de fluorescence permis par les nanostructures pour améliorer la sensibilité des microscopes optiques. Une direction originale est de combiner des effets de piégeage optique dans les nanostructures (nanopinces optiques) avec la caractérisation de transfert de fluorescence FRET. Ces deux approches hautement complémentaires permettront (i) d'utiliser les nanopinces optiques pour augmenter le temps de mesure en FRET et (ii) d'utiliser la résolution nanométrique du FRET pour caractériser les effets des forces optiques. Le domaine de la plasmonique UV est en plein essor et nous poursuivrons nos travaux pour détecter l'autofluorescence naturelle de protéines dans l'ultraviolet et son exaltation par des nanostructures en aluminium. Enfin, nous allons développer davantage les interactions et analogies avec le domaine des radiofréquences pour relier l'optique de champ proche et la nanophotonique aux métamatériaux radiofréquences.

En caractérisation radiofréquence, dans un futur très proche, nous allons mener une étude de la caractérisation de paramètres physicochimiques par le sondage radiofréquence. Cette application nécessite une maîtrise des techniques de caractérisation pour obtenir des précisions de mesures compatibles avec les seuils de mesures envisagés. La première application sera le diagnostic de la glycémie dans des matériaux biologiques.

Enfin, concernant les métamatériaux radiofréquences, dans les prochaines années, nous allons continuer l'activité antenne IRM via un nouveau projet européen M-ONE. Nous avons aussi commencé des travaux sur l'amélioration du temps de réponse et de la sensibilité de la chaîne de détection (scintillateur et détecteur) pour la tomographie par émission de positon (TEP) en utilisant des métamatériaux.

### **Couches minces optiques**

Le développement de filtres optiques interférentiels à hautes performances est un domaine qui nécessite une très forte expertise, notamment lors du design de la structure et de la détermination des stratégies de dépôts. Nous allons donc continuer à développer des méthodes de design de structures compatibles avec des stratégies prédéfinies mais également nous intéresser à l'emploi de la méthode de contrôle optique large-bande pour le développement de stratégies de contrôle automatiques. Nous allons également continuer à prendre part à différents projets scientifiques, notamment pour le spatial afin de fournir à la communauté des composants uniques et adaptés aux besoins du domaine. Enfin, nous allons nous intéresser aux méthodes de structuration de ces composants, que ce soit de la pixélisation ou bien de la génération de gradients pour la réalisation de filtres multispectraux.

Nos activités se traduisent parallèlement par le développement de nouveaux concepts et composants innovants. Le potentiel applicatif des structures à exaltations géantes est avéré et des projets collaboratifs de plus grande envergure sont en cours de montage avec Stellantis pour le développement de capteurs à gaz ultra-sensibles. Par ailleurs l'innovation se poursuit avec une extension à des capteurs en microcavités (collaboration LAAS/CRHEA), qui fournissent une alternative intéressante aux capteurs utilisés en espace libre. L'application de composants optiques résonants en microscopie TIRF exaltée est une autre direction de recherche prometteuse (ANR et prématuration). La micro- et nano-structuration des composants multicouches sera également investiguée pour le développement de composants pour le contrôle des propriétés spatiales et spectrales de la lumière tels que des filtres à réseaux résonnants ou des méta-surfaces optiques. L'aspect développement de nouveaux matériaux à changement de phase ou très forte non-linéarité sera également un axe de direction majeur pour le développement de ce type de composants.

### **Interaction laser-matière aux forts flux**

Les activités dans les prochaines années s'inscrivent dans continuité des travaux décrits : des recherches sur des sujets appliqués, avec en soutien des travaux plus fondamentaux sur l'interaction laser matière. A titre d'exemple, un effort important va être mené dans les prochaines années sur les composants optiques de type diffractifs pour lasers de puissance (réseaux de compression, mise en forme spatiale, contrôle de polarisation, ...) dans le cadre des collaborations décrites et d'un projet Européen (ITN GREAT). On peut également mettre en avant les activités en termes de Super-Resolution (projet ANR jeune chercheur) qui doivent permettre à terme la fabrication des composants optiques (filtres optiques, réseaux de diffraction) présentant de nouvelles fonctionnalités. Pour cette activité un nouveau dispositif expérimental qui permettra la nanostructuration de larges surfaces (mm<sup>2</sup>) avec une résolution sub-longueur d'onde sera mis en place. Ces axes de recherche sont emblématiques car ils s'appuient sur les compétences internes du laboratoire (couches minces, modélisation, tenue au flux laser) et des collaborations inter équipes et inter thèmes.

### Equipe (thème) n°3 – Information et Photonique

Pour les activités en **Téledétection**, la grande dimensionnalité des images rend l'apprentissage profond attrayant pour l'analyse des données hyperspectrales, et les résultats de nos premiers travaux initiés dans ce sens sont prometteurs. Nous avons donc comme perspective de les mener plus avant dans un futur proche. En présence d'importantes variabilités spectrales où les méthodes classiques de démixage atteignent leurs limites, il est envisagé d'exploiter les capacités des méthodes de deep learning pour affecter une collection de signatures spectrales à un même matériau et permettre son identification dans des conditions d'acquisition ou des configurations physico-chimiques différentes du matériau. Les modèles génératifs pourront être utilisés comme préalable pour les algorithmes de classification afin de les rendre invariants aux variabilités spectrales.

Nous étendons nos travaux sur l'étude du milieu interstellaire, en collaboration avec les astrophysiciens du consortium ORION-B. Un des enjeux est notamment de définir de nouvelles approches statistiques permettant d'identifier des modèles physico-chimiques qui réalisent un compromis entre l'interprétabilité des paramètres estimés et la précision d'estimation de ces paramètres.

Dans l'axe **Traitement de l'information et applications**, nous poursuivons nos travaux portant sur l'aide au diagnostic mais également l'aide à la thérapie assistée par ordinateur pour l'imagerie médicale multiparamétrique, en particulier pour les pathologies neurologiques et psychiatriques et la radiothérapie guidée uniquement par l'Imagerie par Résonance Magnétique. Un effort particulier est mis sur l'apprentissage automatique et plus largement les méthodes issues de l'intelligence artificielle, ainsi que sur les stratégies de visualisation en réalité virtuelle et augmentée, pour intégrer notamment la multimodalité sur des données acquises ou générées. Un projet vient également de débiter, suite au recrutement de Rémi André en septembre 2020 en tant que MCF, sur la reconstruction rapide en IRM. Ce projet en collaboration avec le CRMBM vise à mettre en œuvre des méthodes issues de l'intelligence artificielle.

Nous poursuivons et amplifions nos travaux en microscopie pour la biologie, en collaboration notamment avec le thème Imagerie. Nous axons principalement nos efforts sur les systèmes de microscopie non conventionnels, dans des configurations qui requièrent de travailler à faible nombre de photons et/ou de mesures, nécessitant la mise en œuvre d'approches théoriques et d'outils de traitement des données dédiés. Dans ce contexte, nous mènerons ainsi différents travaux en particulier en spectroscopie Raman comprimée, en imagerie super-résolue (STORM) ou en microscopie confocale 3D à balayage adaptatif.

Les travaux liés à la géométrie de l'information et aux statistiques sur les variétés initiés suite au recrutement d'Emmanuel Chevallier en septembre 2018 comme MCF s'intensifieront. Un intérêt particulier est porté au cas des variétés différentielles possédant un grand nombre de symétries, ainsi qu'à la construction d'outils statistiques pour la description des états de polarisation des ondes électromagnétiques.

Nos activités en biométrie utilisant des modèles tensoriels et innovants seront poursuivies. L'objectif est de développer des systèmes automatiques basés sur de la biométrie multimodale pour reconnaître des objets dans un champ de vision, les activités et les mouvements de individus, en exploitant des techniques de vision par ordinateur et d'apprentissage profond.

Dans l'axe **Communications optiques pour l'IoT**, nous allons poursuivre nos recherches sur la technologie d'optique sans-fil pour répondre aux besoins des futurs réseaux de communication B5G (Beyond 5G) et 6G. Ces réseaux doivent, entre autres, être compatibles avec les particularités des applications émergentes, telles que smart-city, smart-home, réseaux de transport intelligents, etc., où les technologies FSO, VLC et UWOC pourront répondre à diverses exigences.

Pour les liaisons FSO, nous comptons continuer nos travaux sur les plateformes à très forte mobilité et les étendre aux liaisons longues portées aéroportées ou spatiales. De telles liaisons permettront des connexions très haut-débit, fiables et sécurisées et pourront également servir de liens « backhaul » pour un réseau B5G ou 6G. Dans

un environnement indoor, nous allons maintenir notre forte activité sur les liaisons infrarouge et VLC pour les applications de smart-home et smart-healthcare où l'on est concerné par des exigences de connectivité IoT « massif ». En particulier, nous comptons concevoir des architectures cellulaires adaptées et développer des solutions efficaces répondant aux besoins de gestion multi - utilisateurs et de la mobilité des usagers, notamment pour un déploiement dans de grandes espaces. A plus long terme, nous allons intégrer les techniques d'intelligence artificielle pour la configuration adaptative des réseaux et le traitement des données issues des capteurs. Enfin dans un contexte d'IoT sous-marin, nous poursuivons nos activités sur les techniques UWOC, notamment dans le but d'améliorer la portée de ces liaisons et leur robustesse dans les scénarios dynamiques. Ces études seront étendues à la recherche des solutions pertinentes pour connecter les engins ou des capteurs sous-marins à l'extérieur par moyen des plateformes aériennes ou spatiales, en particulier.

Ces recherches bénéficieront d'une forte collaboration internationale. En particulier, nous pilotons actuellement l'action COST NEWFOCUS sur la technologie d'optique sans-fil pour les futurs réseaux de télécommunications qui est une merveilleuse opportunité pour mettre en place de nouveaux projets collaboratifs.

Dans l'axe **Milieux désordonnés**, les corrélations dans les champs ondulatoires, électromagnétiques (classiques) ou quantiques seront considérées via des descriptions géométriques qui mettent en évidence les symétries naturelles du problème physique étudié, tel que la sphère de Poincaré pour la polarisation des champs paraxiaux. Un cas d'intérêt particulier sera celui de la polarisation des champs optiques non paraxiaux pour lequel la description sera appliquée à la microscopie. Enfin, on s'intéressera à l'analogie avec l'intrication quantique qui autorise l'utilisation de ces descriptions géométriques pour le classement des états multipartites.

Les études sur les milieux fortement désordonnés ont ouvert de nouvelles applications dans le domaine du biomédical et de l'agriculture de précision. Ainsi l'analyse optique du speckle dynamique devrait à terme fournir un diagnostic robuste des types de mélanomes, dans le cadre du partenariat avec l'INSERM et l'ONERA. Parallèlement, l'activité sur le sondage THz de tissus végétaux (partenariat INRA/INNOLEA/L2C/Fresnel) devrait s'accélérer grâce à la métrologie récemment développée à l'I. Fresnel. Enfin, des collaborations sont en cours d'établissement avec l'hôpital Nord (pathologies cutanées).

Le nouveau projet ANR FIRST avec le GREYC devrait aboutir à des techniques originales d'analyse de surface. Il s'agit d'une part de concevoir des diffusomètres sans mouvement grâce à un façonnage spectral de la puissance incidente, et d'autre part de reconstruire la topographie de surface proprement dite (en lieu et place des moments statistiques). Une technique alternative de microscopie (unidirectionnelle, quantitative, de champ lointain) pourrait en résulter.

L'activité liée aux ondes gravitationnelles va poursuivre son essor dans le cadre des consortiums Virgo et LISA, et en appui sur les nouveaux instruments développés (dont l'interférométrie de rétrodiffusion à faible cohérence). D'autres collaborations sont attendues (Einstein Telescope). On poursuivra l'intégration de réseaux de neurones dans les codes de calcul pour minimiser la diffusion. Ces travaux pourront s'appuyer sur l'Equipex (IDEC) récemment acquis, voire sur le PEPR (I2S2, WP-Miroirs du Futur) en cours d'évaluation dont nous sommes co-porteurs avec le LMA. On signalera également un nouveau projet avec Thales Alenia Space portant sur la contamination particulaire.

Enfin, les travaux portant sur le mimétisme de la chaleur ont débouché sur une activité nouvelle en forte émergence (appuyée par le CNES et le Labtop CILAS/Fresnel), qui concerne le rayonnement thermique des filtres interférentiels. Cela conduira à nous impliquer plus avant dans la modélisation des processus de fluctuation/dissipation, tout en finalisant la mise en œuvre d'une métrologie de l'émissivité qui viendra compléter la plateforme DIFFUSIF.

Pour conclure, soulignons que les financements sont déjà acquis pour une majorité de ces perspectives.

## Equipe (thème) n°4 – Imagerie

### Organisation

Plusieurs financements récemment obtenus soutiennent et structurent la recherche du thème Imagerie pour le prochain quadriennal : l'Equipex+ IDEC (Imagerie et Détection computationnelles), dont l'objectif est de coupler les approches numériques du laboratoire au développement d'instruments uniques, ouverts à la communauté ; L'ERC Starting Grant TEXTOM (Tilman Grunewald) sur les approches d'imagerie de texture par rayons X et de biomécanique des tissus mous; l'ERC Advanced Grant SpeckleCARS (Hervé Rigneault) pour l'Imagerie Raman cohérent large champs dans les tissus. Le thème Imagerie continue d'évoluer aussi par l'effort constant de ses membres pour développer de nouveaux projets et faire vivre ces projets grâce à des financements nationaux (ANR, plan cancer etc..). Le recrutement de chercheurs est aussi un facteur essentiel de renouvellement (voir ci-dessous).

Le thème s'insère dans l'environnement local d'Aix Marseille Université en participant activement aux instituts Marseille Imaging, Neuro Marseille, Marmara (Institut Marseille Maladies rares), ainsi que le Turing center for Biology (biologie quantitative) auquel les chercheurs en biologie contribuent.

Pour le prochain quadriennal, le thème s'organise pour ouvrir le résultat de ses recherches à des collaborateurs externes. Nous promovons les outils de microscopie, endoscopie et plateforme micro-onde du laboratoire auprès des collaborateurs académiques, cliniques et industriels dans le cadre de la plateforme *Photonique* en continuant d'y proposer nos nouveaux instruments matures. Plusieurs microscopes (Raman Cohérent, fluorescence polarisée, fluorescence adaptative) vont bientôt rejoindre cette plateforme. Un nouvel outil pour l'analogie micro-onde sera aussi bientôt ouvert dont les applications s'orientent de manière croissante vers la détection d'objets dans le domaine spatial.

## Recherche

Les efforts seront poursuivis dans la direction du développement d'approches d'imagerie originales et robustes pour la biologie, les matériaux et le biomédical. Les défis les plus importants à relever aujourd'hui sont le gain en sensibilité, rapidité et résolution spatiale de nos instruments, pour permettre de répondre aux questions d'autres disciplines de plus en plus avancées. De nouvelles thématiques de recherche se développeront par ailleurs dans le thème, à travers le recrutement de chercheurs et enseignant-chercheurs :

Une première direction de recherche concerne le développement d'un système photo-acoustique tout-optique ultra-haute fréquence afin d'imager l'activité neuronale à grande profondeur (>1 mm) chez la souris tout en garantissant une résolution quasi-cellulaire (Thomas Chaigne, recrutement CNRS 2019, section 8).

Une deuxième vise à développer un nouveau procédé d'imagerie Raman Cohérent à large champ visant à augmenter la vitesse d'acquisition d'un ou deux ordres de grandeur, dont le principe repose sur l'association de l'imagerie CARS et la microscopie par ptychographie de Fourier pouvant utiliser des champs de Speckle. L'objectif est d'obtenir une résolution spatiale accrue et des champs de vision de plusieurs mm<sup>2</sup> et d'appliquer ce développement à l'histopathologie ultra-rapide sans marquage (Sandro Heuke recrutement CNRS 2021 section 54, ERC AdG SpeckleCARS Hervé Rigneault 2021).

Le développement de nouvelles approches méthodologiques et instrumentales pour le diagnostic biomédical à l'échelle du tissu représente une troisième thématique nouvelle (Julien Fade, recrutement MCF Centrale Marseille 2021). Le procédé repose d'une part sur des développements instrumentaux en optique (polarimétrie, OCT, radio-fréquence) et d'autre part sur une modélisation fine de la propagation de la lumière dans les milieux diffusants et l'optimisation du traitement de l'information. Les applications cliniques visées vont du diagnostic de cornées/greffons cornéens à des problématiques d'imagerie et/ou détection de pathologies de tissus épais (épiderme, col utérin, vascularisation...).

De nouvelles méthodes pour étudier la structure nanométrique de l'enthèse, le tissu reliant le tendon à l'os, par des techniques de tomographie et de diffraction des Rayons X seront également étudiées (Tilman Grünewald, admissible au CNRS 2022, section 5). Ce projet, financé par un contrat ERC starting grant (projet texTOM), vise à explorer les changements de structures associés à la déformation mécanique in situ, et à comprendre les implications biomécaniques.

Enfin, nous nous intéresserons à l'étude des aspects mathématiques de la propagation des ondes (Miguel Alonso, recrutement 2018 Chaire Amidex, Professeur à Centrale Marseille depuis 2021). Ces travaux fondamentaux sur la description et les applications des faisceaux, la cohérence optique, et la connexion entre les modèles de rayon et d'onde de la lumière ouvrent de nouvelles perspectives pour le développement d'instruments d'imagerie innovants.

D'une façon générale, la biologie en tant que thématique propre de recherche se renforce à l'Institut Fresnel à travers des projets en biologie cellulaire du cytosquelette (M. Mavrikis), morphogénèse des tissus (M. Mavrikis et L. LeGoff), physico-chimie de la biominéralisation (V. Chamard), biomécanique des tissus mous (T. Grünewald), et l'étude des micro-organismes thermophiles (G. Baffou). Ces projets s'organisent autour de questions biologiques. Ils sont l'objet de collaborations fructueuses avec les composantes « instrumentation » et « numérique » du thème afin de développer des outils parfaitement adaptés à ces questions. Ces projets fédèrent parfois au-delà du thème Imagerie. Ainsi, nous développons actuellement des microscopes adaptatifs pour l'imagerie des tissus en collaboration avec le thème *Information et Photonique*.

En médecine, un nouvel axe de recherche est l'utilisation de l'imagerie TEP cérébrale du métabolisme du glucose pour démontrer l'atteinte cérébrale spécifique associée au Covid long neurologique. Le professeur Eric Guedj a été nommé expert au ministère de la santé sur le Covid pour piloter la mise en place de la politique de recherche nationale sur le Covid long. Par ailleurs, nous continuons notre effort pour développer de nouvelles méthodes optiques pour l'analyse des pathologies cornéennes. Le professeur Thierry David, coordinateur du service d'ophtalmologie de l'hôpital de la Timone a rejoint l'Institut Fresnel pour travailler avec l'équipe DIMABIO sur l'utilisation de ces techniques pour le diagnostic clinique.

Toujours dans un contexte général, les axes de recherche envisagés pour les prochaines années intégreront de manière croissante les approches numériques et les développements instrumentaux. Des directions en cours de

développement sont le gain en résolution en 3D à partir d'illumination aléatoires et de reconstruction d'images, l'optimisation des estimateurs pour augmenter la dynamique en imagerie scannée et/ou polarimétrique et la gestion des signaux faibles. Nous aborderons aussi des problèmes ouverts tels que l'estimation d'un grand nombre de paramètres partant d'un nombre réduit d'images (super-résolution polarisée, imagerie hyperspectrale, cohérent Raman, ...). Ces approches se font en collaboration étroite avec le thème Information et Photonique.

L'intégration de plusieurs modalités d'imagerie est aussi au cœur de notre recherche. Afin d'améliorer notre compréhension des échantillons, nous souhaitons combiner les informations obtenues avec nos outils d'imagerie à d'autres données. Ainsi, pour étudier l'évolution des tissus biologiques, nous compléterons les images fournies par les microscopes par des techniques de mesures des propriétés mécaniques (tension, forces). Pour étudier la myéline du cerveau dans le petit animal, nous compléterons les informations moléculaires fournies par l'imagerie Raman polarisée par les images cliniques fournies par IRM et PET. En imagerie médicale, nous associerons les mesures TEP à des mesures électrophysiologiques intra-cérébrales (SEEG) sur le modèle de l'épilepsie focale pharmaco-résistante. Nous analyserons d'autres biomarqueurs que le glucose, comme la neurotransmission dopaminergique. Nous souhaitons développer l'intégration des biomarqueurs multiparamétriques dans une approche radiomics mettant à profit les algorithmes d'intelligence artificielle (machine learning et deep learning), en lien avec le thème Information et Photonique (M. Adel). La ptychographie optique vectorielle sera appliquée à l'imagerie d'objets structurés complexes actifs en polarisation et en phase, tels que les méta-surfaces. Sa capacité à imager des champs vectoriels (vortex, speckles) sera également explorée.

Finalement, tous les sujets de recherche présentés dans le document scientifique évoluent naturellement - plaçant le thème Imagerie à la frontière des connaissances. Voici, ci-dessous quelques exemples de projets en cours de conception :

De nouvelles approches d'imagerie Raman cohérent ont été initiées, notamment concernant l'imagerie du métabolisme du sucre, et du métabolisme biosynthétique des protéines dans des organismes modèles (bactéries, levures, *Drosophila*) par incorporation d'éléments deutérés.

En biologie, nous avons initié un projet sur la fonction des septines animales dans l'embryon de *Drosophila*. Nous explorerons le rôle joué par cette protéine dans le contrôle de la mécanique cellulaire et tissulaire par des approches multimodales d'imagerie et de mécano-biologie (opto-génétique, ablation laser, imageries « intelligentes » des tissus, microscopie polarisée).

Un thème de recherche autour du contrôle de la température, utilisant notamment l'imagerie de phase quantitative pour la mesure thermique, est en développement. Il inclut l'étude de la thermophorèse aux petites échelles et l'imagerie « live » de micro-organisme thermophiles (>100°C). Ces travaux se déroulent dans le cadre d'un contrat ERC (CoG, HiPHore) obtenu par Guillaume Baffou.

Enfin l'arrivée des sources synchrotrons de 4<sup>ème</sup> génération constitue une opportunité sans précédent pour l'imagerie X cohérente. Nous souhaitons combiner les performances de ces sources extrêmement brillantes à de nouvelles stratégies de mesures et d'inversion afin d'accéder aux variations en temps réel de systèmes cristallins dynamiques (processus de cristallisation synthétique ou biologique in vivo.)

## **ANNEXE 2**

### **PLAN DE CONTINUITE D'ACTIVITE INSTITUT FRESNEL**

## PLAN DE CONTINUITE D'ACTIVITE - INSTITUT FRESNEL

L'activité des personnels de l'unité est régie par l'instruction donnée par ses tutelles, en fonction des directives gouvernementales.

Les règles d'hygiène en vigueur sont régulièrement rappelées aux personnels, et l'équipement nécessaire (gel, masques, produit de désinfection) est fourni avec l'aide des tutelles. L'unité met en place une organisation liée à la situation sanitaire : plan de présence partielle des personnels avec télétravail, plan d'occupation réaménagé pour les salles de réunions et bureaux partagés, limitation d'accès aux espaces de restauration (une cafétéria), plan de circulation entrée/sortie et couloirs.

En cas de crise sanitaire les personnels dont les fonctions concernent des postes critiques ont accès au laboratoire le cas échéant : ceux-ci sont communiqués aux tutelles via un tableau tel que ci-dessous.

Précisez les activités vitales à maintenir en complétant le tableau ci-dessous	Préciser le bâtiment et site concerné dans le cas des laboratoires multisites	Présence sur site obligatoire			
		Nom-Prénom	Employeur	fréquence de passage sur site	tranches horaires envisagées
Direction du laboratoire : Préciser la ou les personnes mobilisables	Bâtiment principal et espace photonique		CNRS	en cas d'alarme	journée
<b>Activité vitale :</b> préciser le type d'activité qui sera maintenue - activité en lien avec la crise actuelle, entretien des collections, ...					
<b>maintenance des équipements critiques</b> préciser les installations qui ne pourront pas être arrêtées; surveillance du fonctionnement des congélateurs, container azote, F3, équipements particuliers, ...					
container azote liquide (stockage de cellules)	Espace photonique		CNRS	livraison	journée
Congélateurs -80°C	Bâtiment principal et espace photonique		CNRS	en cas d'alarme	journée
serveurs	Bâtiment principal		AMU	en cas d'alarme	journée
Enceinte sous vide FIB (installation non éteinte)	Bâtiment principal		CNRS	2 fois par semaine	journée
mouches (préparation de la nourriture et entretien des lignes transgénériques)	Bâtiment principal		CNRS	2 fois par semaine	journée
Systèmes de refroidissement des chambres à vide de dépôt (installation non éteinte)	Espace photonique		CNRS	2 fois par semaine	journée

Le suivi des personnels ITA/IATSS est effectué via le type de tableau ci-dessous.

Planning PCA - AMU		MARS 2020														AVRIL 2020														MAI 2020		
Congés zone A																																
Congés zone B																																
Congés zone C																																
semaine		12				13				14				15				16				17				18						
Prénom Nom		L	M	J	V	S	D	L	M	J	V	S	D	L	M	J	V	S	D	L	M	J	V	S	D	L	M	J	V	S	D	
Biatss	TI																															
	TI																															
	TM																															
	TM																															
	TM																															
	TI																															
	TI																															
	TM																															
	TI																															
	TI																															

TI Télétravail Intensif : activité en télétravail supérieure à 60% de l'activité normale de l'agent (par jour)

TM Télétravail Partiel : activité partielle en télétravail (par jour)

DERO Travail présentiel par dérogation prévue au PCA

ASA ASA (autorisation spéciale d'absence)

AT Arrêt de travail

C Congés

En période de sortie de crise progressive, la reprise en travail présentiel des personnels est gérée et communiquée aux tutelles via un plan de reprise d'activité suivant les tableaux ci-dessous :

N°Unité	Sigle	DR	Activité(recherche, soutien, support)	Effectifs impliqués en présentiel dans la reprise 11 mai	Effectifs impliqués présents simultanément au 11 mai (<15 à 20% max)	Effectifs impliqués en présentiel dans la reprise 25 mai	Effectifs impliqués présents simultanément au 25 Mai (11 mai + 10 à 20% max)	Effectifs impliqués en présentiel dans la reprise 11 juin	Effectifs impliqués présents simultanément au 11 juin (50% max)
UMR7249	FRESNEL	DR12	Projets expérimentaux: cela implique en priorité 70 non-permanents + 20 permanents	90	40	100	80	120	95
UMR7249	FRESNEL	DR12	Services communs	4	3	19	10	19	10

DAC  
DIRECTION DE L'AMLIORATION CONTINUE

**PLAN DE REPRISE D'ACTIVITE**  
**Tableau de priorisation des activités**

RECENSEMENT DES ACTIVITES		ACTIVITES REALISEES EN PERIODE DE CONFINEMENT			ACTIVITES A MENER A LA REPRISE			AVEC D'AUTRES STRUCTURES		AVEC D'AUTRES STRUCTURES		MOODALITES DE REPRISE		Type de locaux affectés à l'activité		Remarques ou Besoins éventuels
NOM DE LA STRUCTURE	ACTIVITES	Caractéristique de l'activité (récurrente, cyclique, spécifique à la gestion de crise)	Recommandation du Plan de Continuité d'Activité	Taux de réalisation	Reste à faire	URGENCE	VOLUMETRIE	IMPACT SI NON REALISE	Si ou/ lesquelles	partiellement	L'activité est réalisable en télétravail (possible, partiellement possible, impossible)	Personnel nécessaire pour la prendre en charge (en nb)	Personnel en capacité de la prendre en charge à distance (en nb)	à distance (en nb)		
DRH	Paye mode dégradé	Spécifique à la gestion de crise	Obligatoire	100 % Réalisation		Très urgent	Très importante	Critique	Agence comptable	DRH - Paye à l'agon	possible			Bureau partagé (distance supérieure à 1m50)		
SCINCES - SCOLAIRE	Prise d'activité en autonomie (arts non-démarcatifs)	Récurrente	Non concerné	0 % Reprise normale de l'activité	0 % Reprise normale de l'activité	Très urgent	Moyenne	Critique	Agence comptable	DRH - Paye à l'agon	possible			Bureau partagé (distance supérieure à 1m50)		
Laboratoire recherche	Atelier matériel	Récurrente	À réaliser si possible	25 % Reprise normale de l'activité	25 % Reprise normale de l'activité	Urgent	Moyenne	Fort	Bureau des matériels, services comptables		possible			Bureau isolé		
INSTITUT RESNÉ	Accueil Logistique	Récurrente	Obligatoire	0 % Reprise normale de l'activité	0 % Reprise normale de l'activité	Très urgent	Moyenne	Critique	Activités de recherche à l'étranger		impossible			Bureau isolé		
INSTITUT RESNÉ	service administratif	Récurrente	Obligatoire	25 % Reprise normale de l'activité	25 % Reprise normale de l'activité	Urgent	Importante	Fort	25 et Cédit		impossible			Bureau partagé (distance supérieure à 1m50)		
INSTITUT RESNÉ	service instrumentation	Récurrente	Obligatoire	0 % Reprise normale de l'activité	0 % Reprise normale de l'activité	Peu urgent	Importante	Fort	Incident aux manips		possible			Bureau partagé (distance supérieure à 1m50)		
INSTITUT RESNÉ	Equipe Athena	Récurrente	Obligatoire	25 % Reprise normale de l'activité	25 % Reprise normale de l'activité	Urgent	Fort	Fort	activité de recherche		possible			Bureau isolé		
INSTITUT RESNÉ	Equipe Centre	Récurrente	Obligatoire	25 % Reprise normale de l'activité	25 % Reprise normale de l'activité	Urgent	Fort	Fort	activité de recherche		possible			Bureau isolé		
INSTITUT RESNÉ	Equipe Cosmo	Récurrente	Obligatoire	25 % Reprise normale de l'activité	25 % Reprise normale de l'activité	Urgent	Fort	Fort	activité de recherche		possible			Bureau isolé		
INSTITUT RESNÉ	Equipe Dima	Récurrente	Obligatoire	25 % Reprise normale de l'activité	25 % Reprise normale de l'activité	Urgent	Fort	Fort	activité de recherche		possible			Bureau isolé		
INSTITUT RESNÉ	Equipe Epsilon	Récurrente	Obligatoire	25 % Reprise normale de l'activité	25 % Reprise normale de l'activité	Urgent	Fort	Fort	activité de recherche		possible			Bureau isolé		
INSTITUT RESNÉ	Equipe Gamma	Récurrente	Obligatoire	25 % Reprise normale de l'activité	25 % Reprise normale de l'activité	Urgent	Fort	Fort	activité de recherche		possible			Bureau isolé		
INSTITUT RESNÉ	Equipe Iota	Récurrente	Obligatoire	25 % Reprise normale de l'activité	25 % Reprise normale de l'activité	Urgent	Fort	Fort	activité de recherche		possible			Bureau isolé		
INSTITUT RESNÉ	Equipe Kappa	Récurrente	Obligatoire	25 % Reprise normale de l'activité	25 % Reprise normale de l'activité	Urgent	Fort	Fort	activité de recherche		possible			Bureau isolé		
INSTITUT RESNÉ	Equipe Lambda	Récurrente	Obligatoire	25 % Reprise normale de l'activité	25 % Reprise normale de l'activité	Urgent	Fort	Fort	activité de recherche		possible			Bureau isolé		
INSTITUT RESNÉ	Equipe Mu	Récurrente	Obligatoire	25 % Reprise normale de l'activité	25 % Reprise normale de l'activité	Urgent	Fort	Fort	activité de recherche		possible			Bureau isolé		
INSTITUT RESNÉ	Equipe Nu	Récurrente	Obligatoire	25 % Reprise normale de l'activité	25 % Reprise normale de l'activité	Urgent	Fort	Fort	activité de recherche		possible			Bureau isolé		
INSTITUT RESNÉ	Equipe Xi	Récurrente	Obligatoire	25 % Reprise normale de l'activité	25 % Reprise normale de l'activité	Urgent	Fort	Fort	activité de recherche		possible			Bureau isolé		
INSTITUT RESNÉ	Equipe Omicron	Récurrente	Obligatoire	25 % Reprise normale de l'activité	25 % Reprise normale de l'activité	Urgent	Fort	Fort	activité de recherche		possible			Bureau isolé		
INSTITUT RESNÉ	Equipe Pi	Récurrente	Obligatoire	25 % Reprise normale de l'activité	25 % Reprise normale de l'activité	Urgent	Fort	Fort	activité de recherche		possible			Bureau isolé		
INSTITUT RESNÉ	Equipe Rho	Récurrente	Obligatoire	25 % Reprise normale de l'activité	25 % Reprise normale de l'activité	Urgent	Fort	Fort	activité de recherche		possible			Bureau isolé		
INSTITUT RESNÉ	Equipe Sigma	Récurrente	Obligatoire	25 % Reprise normale de l'activité	25 % Reprise normale de l'activité	Urgent	Fort	Fort	activité de recherche		possible			Bureau isolé		
INSTITUT RESNÉ	Equipe Tau	Récurrente	Obligatoire	25 % Reprise normale de l'activité	25 % Reprise normale de l'activité	Urgent	Fort	Fort	activité de recherche		possible			Bureau isolé		
INSTITUT RESNÉ	Equipe Upsilon	Récurrente	Obligatoire	25 % Reprise normale de l'activité	25 % Reprise normale de l'activité	Urgent	Fort	Fort	activité de recherche		possible			Bureau isolé		
INSTITUT RESNÉ	Equipe Phi	Récurrente	Obligatoire	25 % Reprise normale de l'activité	25 % Reprise normale de l'activité	Urgent	Fort	Fort	activité de recherche		possible			Bureau isolé		
INSTITUT RESNÉ	Equipe Chi	Récurrente	Obligatoire	25 % Reprise normale de l'activité	25 % Reprise normale de l'activité	Urgent	Fort	Fort	activité de recherche		possible			Bureau isolé		
INSTITUT RESNÉ	Equipe Psi	Récurrente	Obligatoire	25 % Reprise normale de l'activité	25 % Reprise normale de l'activité	Urgent	Fort	Fort	activité de recherche		possible			Bureau isolé		
INSTITUT RESNÉ	Equipe Omega	Récurrente	Obligatoire	25 % Reprise normale de l'activité	25 % Reprise normale de l'activité	Urgent	Fort	Fort	activité de recherche		possible			Bureau isolé		

## **ANNEXE 3**

### **PLATEFORMES LABELLISEES - INSTITUT FRESNEL**



# Photonique platform

## Espace Photonique

*A technological platform dedicated to optical thin films*

Created in September 2014 and inaugurated in June 2015, the Espace Photonique is a technological platform dedicated to experimental Optics and Photonics.

It includes 250 m<sup>2</sup> of clean rooms (10,000 and 100,000 class) dedicated to the fabrication and the characterization of optical interference filters. Thus, the Espace Photonique is a unique platform in France for the realization of components based on optical thin-films.

### Technical capabilities for thin film deposition

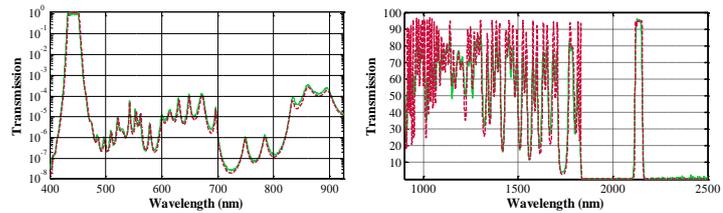
- Deposition technologies
  - Plasma Assisted Reactive Magnetrons Sputtering (PARMS) – Bühler/Leybold Optics HELIOS machine. Deposition of complex multilayer structures based on metal and dielectric materials with up to several hundreds of layers and associated total thickness of several tens of microns.
  - Plasma Assisted Ion Beam Deposition Bühler/Leybold Optics SYRUSpro 710 machine. Deposition of multilayer structures based on standard (oxydes, metals) and exotic (chalcogenide) materials.
- Substrate preparation with an automatic cleaning machine (SIEM TCA 90) for reproducible cleaning of inorganic substrates before coating.



## Technical capabilities for characterization

The Espace Photonique also includes characterization rooms for spectrophotometry and microscopy that combine all required systems for the certification of the fabricated components. They allow characterizing both the optical and geometrical performances of the fabricated optical interference filters.

- 2 Perkin Elmer Lambda 1050 spectrophotometers that allow measuring transmission and absolute reflection from 200 up to 2500 nm.
- 1 scattering-Scanning Near-field Optical Microscope from Neaspec GmbH for local measurements of the reflectivity and absorption.
- 1 Fourier Transform Infrared spectrometer (FTIR), Thermo Fischer Nicolet 6700, allows measuring transmission in a spectral region from 2.5 up to 20  $\mu\text{m}$
- 1 optical profilometer based on white light interferometry (ZYGO NewView 7300) for the characterization of the flatness and the roughness of the fabricated components
- Customed optical bench for specific spectral and/or angular performances of the components

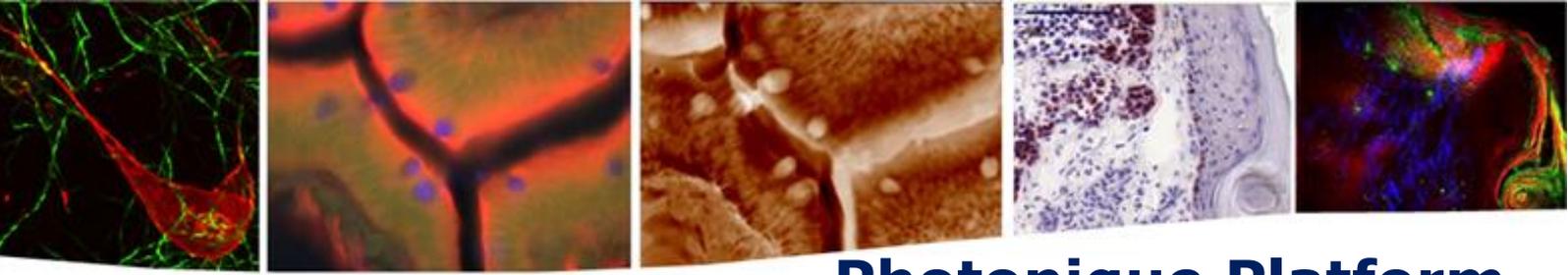


## Field of applications

The Espace Photonique allows manufacturing complex optical filters with dedicated high performances for a wide range of applications including space, high power lasers, biology, medical, automotive, safety, luxury...

Contact: Julien Lumeau, [julien.lumeau@fresnel.fr](mailto:julien.lumeau@fresnel.fr)





# Photonique Platform Biological Imaging

*A technological platform dedicated to provide innovative optical solutions to researchers working in the field of life sciences.*

The platform gathers a variety of optical microscopy tools to perform imaging and single molecule analysis.

## Available techniques

- Quantitative phase microscopy
- Polarization-resolved fluorescence microscopy
- Polarization-resolved nonlinear microscopy
- Fluorescence correlation spectroscopy
- Coherent Raman (CARS/SRS) microscopy
- Nonlinear (2photon, SHG, THG) microscopy
- Nonlinear endoscopy
- Photoacoustic microscopy
- Optical coherence tomography



©Tiffem Ripoll - VOST Collectif / Institut Carnot STAR

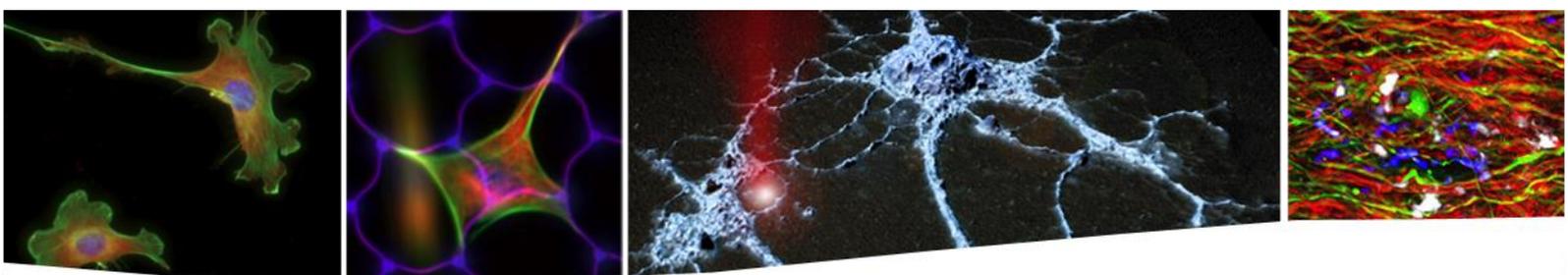
## Available measurements

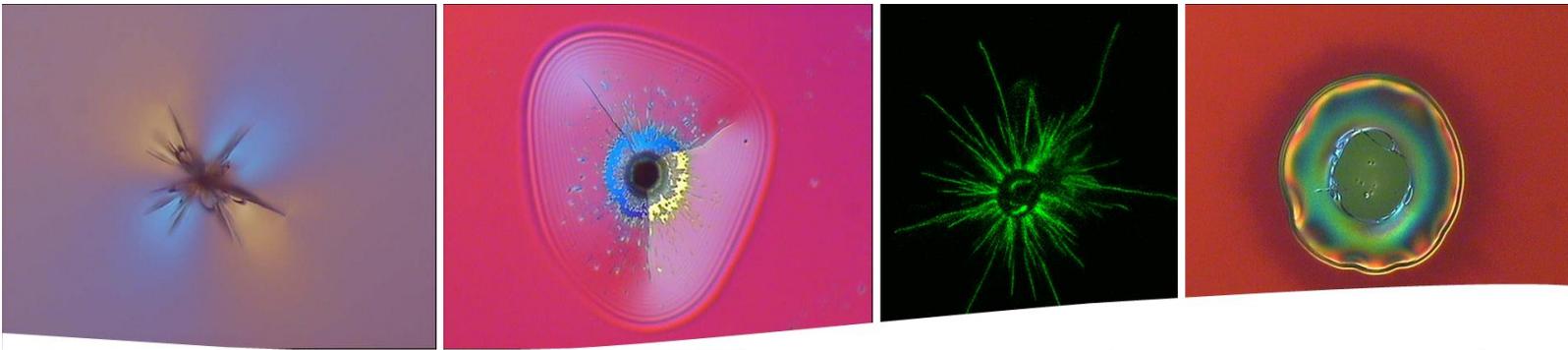
- Dry mass monitoring of living cells
- Optical retardance imaging
- Probing orientational order of biological molecules
- Label-free imaging of tissues
- Drug penetration in tissues
- Lipid metabolism
- Myelin organization
- Tissue morphology



©Tiffem Ripoll - VOST Collectif / Institut Carnot STAR

Contact: Hervé Rigneault





# Photonique platform

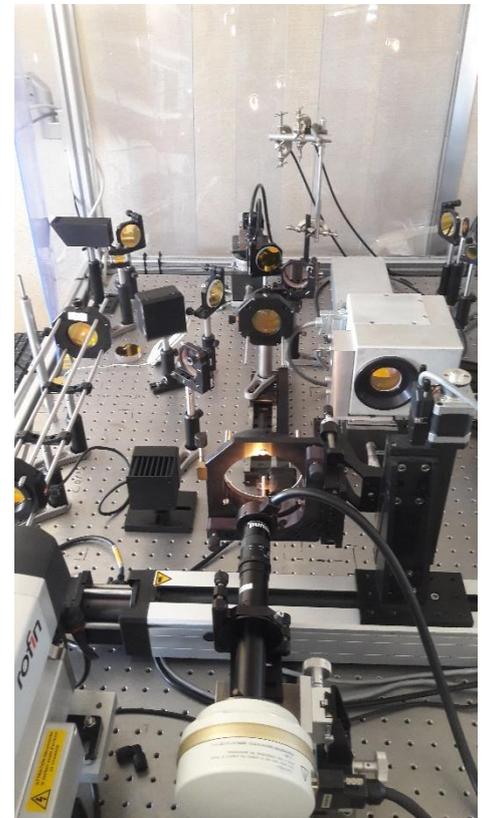
## High power Photonics

*A technological platform dedicated to Laser Damage Tests and the study of laser material interactions.*

The Institut Fresnel gathers a set of means, laser sources and experiments, allowing the characterization of optical components under high power laser flux. The available sources cover the CW, nanosecond, picosecond and femtosecond regimes, with wavelengths from UV to IR. In addition, characterization systems can be used for the analysis of the laser-matter interaction.

### Available laser sources

- CW Lasers
  - Ytterbium fiber lasers (1080 nm), up to 2 kW
  - Fiber coupled diode lasers (808, 980 nm), up to 200 W
  - CO<sub>2</sub> lasers (10.6 μm), up to 200 W
- Pulsed (ns) Lasers
  - Flash lamps and diode pumps YAG lasers (1064 / 532 / 351 / 266 nm), up to 1 J per pulse (10 ns) and 100 Hz.
  - Ultrashort pulses (ps,fs) lasers
  - High repetition rate (MHz) femtosecond lasers (1030 / 515 nm), up to 35 W (500 fs)
  - High energy femtosecond lasers (1030 / 51 nm), up to 1 mJ per pulse (500 fs)
- Additional systems
  - Different laser processing head and associated f-theta lenses are available
  - Tests and experiments can be conducted in vacuum or controlled atmosphere
  - Thermal cameras, high speed cameras, spectrometers... can be associated to the experiments



## Available laser damage tests

The Institut Fresnel has more than 20-year experience in laser damage testing of optical components. Standard or custom tests can be conducted at all pulse durations and wavelength available. Under standard conditions, samples with a diameter up to 50 mm can be tested, under normal or oblique incidence, in reflection or transmission, with spots ranging from 100 microns (pulsed lasers) to several mm (CW lasers).

- Available test protocols

Standardized tests as defined in ISO 21254-1,-2,-3,-4 can be performed (1 on 1, S on 1) or tests on request (Raster Scan, R on 1, etc...).

A test report is issued with each test including the conditions of realization, the procedures used, the characterization of the beam based on ISO standards, and the damage probability curves, damage densities or other relevant quantities specific to the test performed

- Characterization

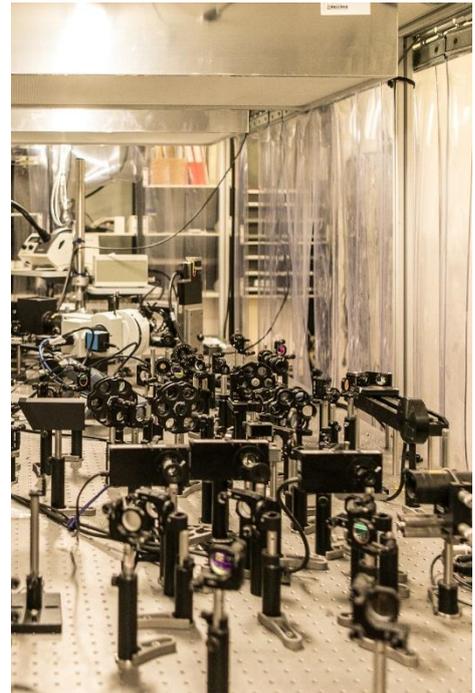
State-of-the-art diagnostics tools allow for in-situ monitoring and post-test investigation: Optical interference microscopy, Scanning Electron Microscopy, Atomic Force Microscopy, Confocal Microscopy, Optical Profilometry.

- Laser-Induced Contamination

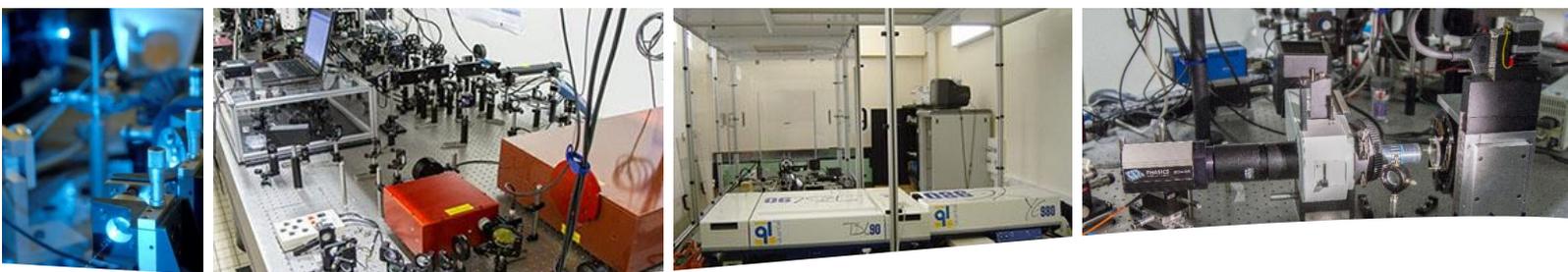
Test chambers are available to evaluate the suitability of materials and components in terms of Laser Induced Contamination under long time exposure.

- Absorption measurements

An experimental set-up, based on Lock-in Thermography, is available for the measurement of optical components absorption down to the ppm (part per million). The system operates at 1080 nm.



Contact: Jean-Yves Natoli, [jean-yves.natoli@fresnel.fr](mailto:jean-yves.natoli@fresnel.fr)



## DIFFUSIF

### Plateforme de Métrologie et instrumentation optique par et pour la lumière diffuse

**DIFFUSIF** est une plateforme instrumentale dédiée à la métrologie par et pour la lumière diffuse (BRDF, Haze, Albedo...). Elle est constituée d'une dizaine d'instruments originaux et innovants permettant de réaliser les actions suivantes :

- ✓ Mesure spectrale large-bande (450 -1650 nm) de la diffusion par les composants optiques
- ✓ Mesure angulaire de la diffusion dans tout le domaine large-bande précité
- ✓ Mesure polarimétrique de la diffusion dans tout le domaine large-bande précité
- ✓ Diagnostic en diffusion « blanche »
- ✓ Métrologie de la rétro-diffusion
- ✓ Analyse d'états de surface, analyse d'états de volume, couches minces optiques
- ✓ Séparation des rugosités de surface et des hétérogénéités de volume
- ✓ Extraction des défauts localisés
- ✓ Analyse de speckle, polarisation et cohérence en milieux désordonnés ...

Les différents instruments sont conçus et développés en interne en fonction des besoins scientifiques lorsque ceux-ci nécessitent une métrologie extrême. Certains d'entre eux sont amenés à devenir pérennes, c'est le cas des instruments phares qui sont identifiés comme :

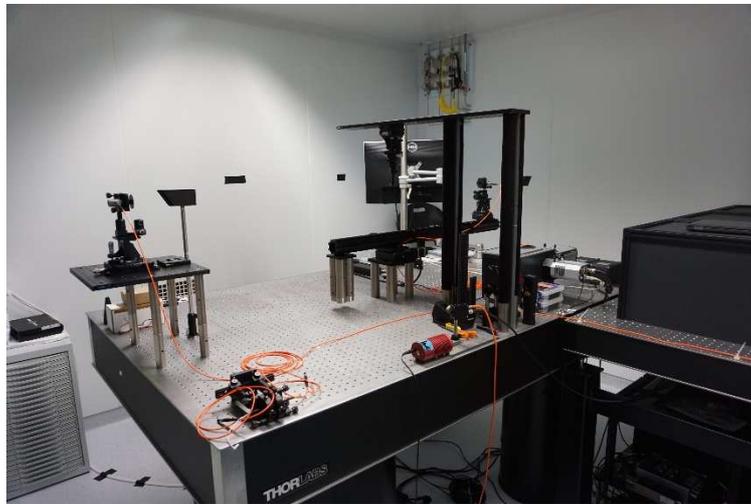
#### *Instrument SALSA*

**SALSA** (Spectral and Angular Light Scattering Apparatus) qui permet l'enregistrement angulairement et spectralement résolu de la lumière diffusée (Mesures de BRDF, BTDF, BSDF, ESDF....)

#### **Spécifications Techniques :**

- ✓ Performances d'un diffusomètre laser sur l'ensemble du domaine spectral : 415-1650 nm
- ✓ Choix arbitraire de la longueur d'onde d'éclairage sur [415 nm – 1650 nm]
- ✓ Seuil de détectivité à  $10^{-8}$  str<sup>-1</sup> (limité par la diffraction de Rayleigh)
- ✓ Plus de 15 décades de dynamique de mesure
- ✓ Première mesure mondiale de densités optiques supérieures à 14

- ✓ Précision meilleure que 1%
- ✓ Salle blanche ISO 6 - Espace Photonique
- ✓ Instrument référencé par le CNES, l'AID, l'ESA et les consortiums LISA et Virgo.



**Instrument SALSA en salle blanche ISO 6 dans l'Espace Photonique**

**Références** : [Opt. Express 23, 26863–26878 \(2015\)](#) [Opt. Lett. 40, 3225–3228 \(2015\)](#), [SPIE OSD, 9627 1B \(2015\)](#), [Applied optics 55 9680-9687 \(2016\)](#), [CEAS Space Journal 017 -0156, \(2017\)](#), [Optics Express, 26 \(26\), pp.34236 \(2018\)](#). , [Optics Letters, 45 \(9\), 2506-2509 \(2020\)](#),

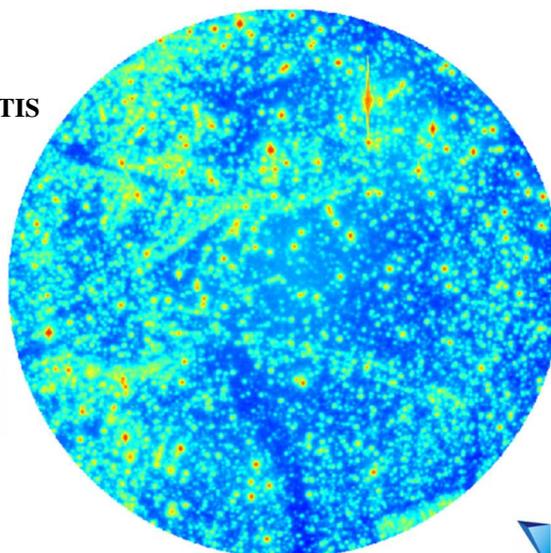
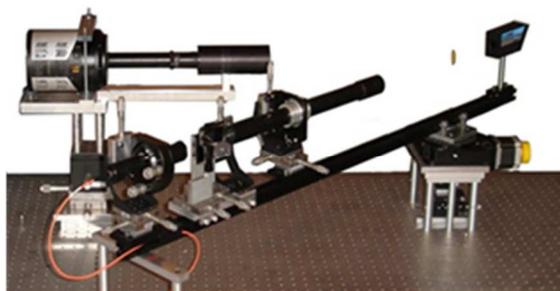
**Ils en ont parlé :**

- ✓ Revue Photoniques, Highlight sur la version proche Infra-rouge (1000 nm- 1650 nm) de l'instrument - 2020
- ✓ NKP Photonics, Annonce sur leurs réseaux sociaux de la disponibilité de la version Proche Infra-Rouge de l'instrument, 2020
- ✓ Revue Labs Explorer, 2019, DIFFUSIF est classée parmi les 40 « infrastructures et plateformes européennes qu'un scientifique doit connaître »
- ✓ *NKT Photonics* (Photo de l'instrument sur la page d'ouverture du site du constructeur pendant 18 mois (2017) et lien vers sa description pour la version Visible (450 nm – 1000 nm) de l'instrument.
- ✓ *CNRS INSIS* (faits marquants INSIS, 2016)
- ✓ *Advances in Engineering* (Highlight en 2016)
- ✓ *ED 352 / AMU* : Prix de thèse de l'Ecole doctorale 352 (2016), et prix de thèse AMU (2017) pour la thèse dont le développement de l'instrument pour le spectre visible a été le centre.

## Instrument SPARSE

**SPARSE (SPAtially Resolved Scatterometry Equipment)**, est conçu pour réaliser une mesure spatialement résolue de la BRDF des surfaces considérées. Seul instrument au monde ayant cette capacité avec une telle détectivité, il offre en conséquence un accès immédiat à la stationnarité de la rugosité. Mais aussi, cet instrument permet d'identifier et quantifier le poids des défauts localisés en regard de la rugosité locale intrinsèque. ([Opt. Eng., 53\(9\), 092012 \(2014\), special issue invited paper](#), [Applied Optics 53, A297-A304 \(2014\)](#), [Optics Com.282 \(7\)2009, 1265-1273](#))

**Instrument SPARSE et cartographie de TIS**



### **Spécifications Techniques :**

- |  |   |
|--|---|
| ✓ Surface analysée : 20 mm de diamètre   | ✓ Discrimination rugosité intrinsèque / défauts |
| ✓ Résolution latérale : 26 $\mu\text{m}$ de côté   | ✓ Extraction de la topographie de la surface    |
| ✓ $10^6$ BRDF enregistrées en parallèle  |   |
| ✓ Seuil de détectivité à $10^{-8}$ $\text{str}^{-1}$ ; (limité par la diffraction de Rayleigh) |   |

Cet instrument est en cours d'évolution grâce à une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du Programme d'Investissements d'Avenir portant la référence ANR-21-ESRE-0002 – projet IDEC.

## MétROLISA

**MétROLISA** est un banc de METrologie de la lumière Rétrodiffusée par les Optiques du LISA (*Laser Interferometer Space Antenna*) prochaine génération de détecteur d'ondes gravitationnelles.

Ainsi, pour le projet LISA par exemple, c'est bien la maîtrise de la rétro-diffusion (*backscattering*) qui constitue le challenge à relever, alors qu'aucun instrument ne permet à ce jour de réaliser cette mesure avec les détectivités nécessaires. Ceci nous a amenés à concevoir et à mettre au point un instrument dédié à la mesure de la rétro-réflexion et de la rétro-diffusion (diffusion dans la direction du faisceau incident) d'interfaces optiques traitées ou non.



Cet instrument, original dans sa conception, résulte du couplage d'un diffusomètre avec un interféromètre utilisé avec une source large bande, ce qui permet de localiser le phénomène d'interférences autour d'un point de différence de marche nulle et ainsi de mesurer séparément la contribution de chacune des interfaces en rétro-réflexion et rétro-diffusion. L'utilisation d'une détection balancée permet en outre de s'affranchir en grande partie du bruit induit par les fluctuations d'intensité de la source et d'atteindre ainsi des

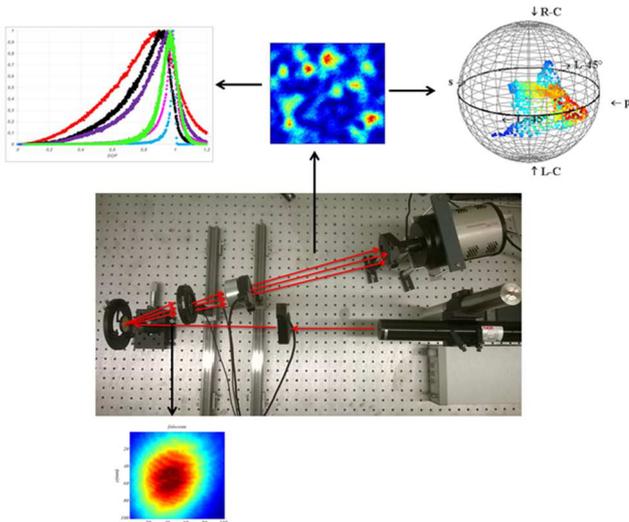
sensibilités extrêmes. Le seuil de détectivité est aujourd'hui de l'ordre de  $10^{-10}$  pour la mesure du coefficient de rétro-réflexion, ce qui donne accès à la caractérisation d'anti-reflets hautes performances dans leurs conditions nominales d'utilisation.

Enfin, les techniques de déconvolution mises en œuvre donnent en outre accès aux variations spectrales de ces mêmes coefficients de réflexion en amplitude et en phase, ce qui fait de ce montage un instrument unique au monde à ce jour.

Instrument réalisé avec le soutien de la fondation AM\*I dex et du CNES, dans le cadre des activités de la plateforme pour le consortium du LISA.

**Performances :** [Phys.Rev.Applied, 2021, 16 \(4\), pp.044055.](#)

**Ellipsomètre spatialement résolu à une échelle sub-speckle**

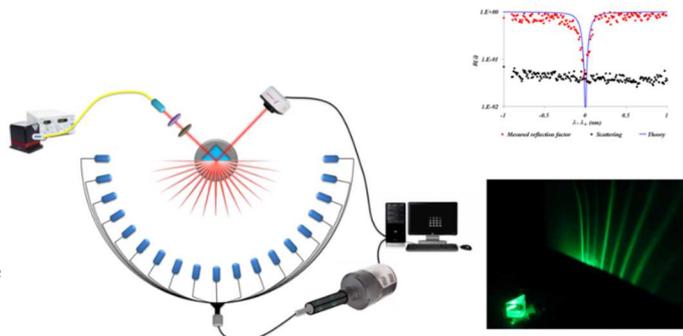


Cet instrument permet de mesurer le degré (dop) et l'état de polarisation de la lumière diffusée, à une échelle en dessous de la taille du speckle. Il permet d'identifier les dépolarisations spatiales et temporelles, les repolarisations... Les résultats sont fournis sous forme d'histogrammes de dop ou de cartographies des paramètres polarimétriques dont les études locales ou statistiques appuient l'identification de signatures.

**Performances :** [Optics Express 22, 14594-14609 \(2014\)](#), [Optics Express, Vol. 22, Iss. 18, p. 21427 \(2014\)](#).

**One Shot Scatterometer**

**One Shot Scatterometer** est un diffusomètre à très haute résolution spectrale et sans mouvement mécanique. Conçu pour la métrologie des champs exaltés par des structures hautement résonantes, cet instrument permet d'enregistrer les indicatrices angulaires de diffusion et les réponses spéculaires associées avec une résolution spectrale de l'ordre du pm sans aucun mouvement mécanique.



**Diffusomètre One Shot et mesure d'une structure résonante**

### *Autres instruments...*

**TISS** (*Total Integrated Spectral Scattering*) met en jeu une sphère intégrante pour cartographier les centres diffusants sur les échantillons. Il a été développé dans le cadre d'un partenariat avec le Fraunhofer IOF de Iena.

Un **Diffusomètre monochromatique** "classique" et un **Diffusomètre instantané à un seul angle** sont également disponibles

La plateforme est en constante évolution, n'hésitez à nous contacter pour des besoins spécifiques ...

### *Informations pratiques :*

- ✓ **Localisation** : Aix Marseille Université, site de Saint Jérôme, Institut Fresnel
- ✓ **Experts** : Claude Amra, Michel Lequime, Myriam Zerrad (correspondant AFNOR / ISO)
- ✓ **Références**: DIFFUSIF est référencée par les agences spatiales française (CNES) et européenne (ESA) ainsi que par les consortium LISA et Virgo.
- ✓ **ACTPHAST 4.0 et PhotonHub** : DIFFUSIF est membre des réseaux européens ACTPHAST 4.0 et PhotonHub. Dans ce contexte, des projets partenariaux entre une entreprise européenne et la plateforme peuvent être éligibles à un financement ou un co-financement par ces réseaux jusqu'en 2022 (ACTPHAST 4.0) et 2025 (PhotonHub)
- ✓ **ACTPHAST 4.R** : DIFFUSIF est également membre du réseau européen ACTPHAST 4.R, pendant du réseau ACTPHAST 4.0 dédié aux projets partenariaux entre laboratoires européens sur la période 2018-2022

[www.fresnel.fr/diffusif](http://www.fresnel.fr/diffusif)

Contact : [myriam.zerrad@fresnel.fr](mailto:myriam.zerrad@fresnel.fr)

## **ANNEXE 4**

### **LABORATOIRES COMMUNS INSTITUT FRESNEL**

## LABORATOIRES COMMUNS INSTITUT FRESNEL

L'I. Fresnel est impliqué dans trois laboratoires communs.

**LabCom CILAS** : Dans la but de formaliser les très nombreuses années de collaborations entre l'Institut Fresnel et l'entreprise CILAS et en particulier la branche couches minces optiques à Aubagne, La laboratoire commun de traitement optique des surfaces a été créé en 2014 puis renouvelé en 2018 et 2022 pour des durées de 4 ans. Ce laboratoire regroupe les chercheurs et enseignants-chercheurs des équipes RCMO, ILM et CONCEPT et a permis de financement de 5 thèses de doctorat (+ leur contrat d'accompagnement) sur la période 2016-2021. Parmi les thématiques traitées, on peut citer les méthodes de contrôle optique, la diffusion, le rayonnement infrarouge ou l'absorption dans les composants en couches minces optiques.

**Automotive Motion Lab** (1er OpenLab du réseaux Stellab, les laboratoires communs de PSA Groupe, aujourd'hui Stellantis). Ce laboratoire commun entre PSA Groupe et Aix Marseille Université, créée en 2011, était à l'origine porté par l'ISM (Institut des Sciences du mouvement), il a ensuite intégré l'Institut Fresnel lors de son 1er renouvellement en 2015, puis l'UMR PRISM (Perception, Représentations, Image, Son, Musique) lors de son deuxième renouvellement en 2020. Ce laboratoire commun est centré sur l'humain et la manière dont il interagit avec le véhicule, par le biais de son fonctionnement perceptif et cognitif. Les activités de l'OpenLab sont déclinés selon 4 axes de recherche : 1.Perception / 2.Régulation / 3.Interaction multimodale / 4.Simulations. L'Institut Fresnel pilote l'axe 1 et est intégré dans l'axe 3. Les activités du laboratoire sur des technologies de viseurs tête haute, l'utilisation de méta-surfaces pour du jaillissement d'images 3D dans des systèmes d'aide à la conduite et sur la synthèse et le développement d'un "nez optique" ou détecteur d'odeur ultra-sensible sur la base de composants multicouches diélectriques résonnants. Les travaux de l'Automotive Motion Lab impliquent 6 personnels permanents de l'Institut Fresnel et l'entreprise Stellantis a financé plusieurs contrats de recherche, à hauteur de 170 k€ et une thèse CIFRE sur la période.

**Labcom LOLaH (Laboratoire Optique Lasers et Hyperfréquences)**. Après une collaboration continue depuis 1998 entre l'Institut Fresnel et le CEA DAM (centres CESTA et Ripault), le Labcom LOLaH (Laboratoire Optique Lasers et Hyperfréquences) a été créé le 12 mars 2020. Plus de 20 personnes sont impliquées, en moyenne 3 thèses financées en cotutelles, 4 contrats de recherche/an (≈150k€). 9 axes thématiques sont développés, concernant notamment la métrologie de la tenue au flux laser des composants, les procédés de structuration et de réparation et la modélisation des matériaux pour les applications optiques et hyperfréquences.