

RAPPORT SCIENTIFIQUE de l'INSTITUT FRESNEL

2017- 2019

Table des matières

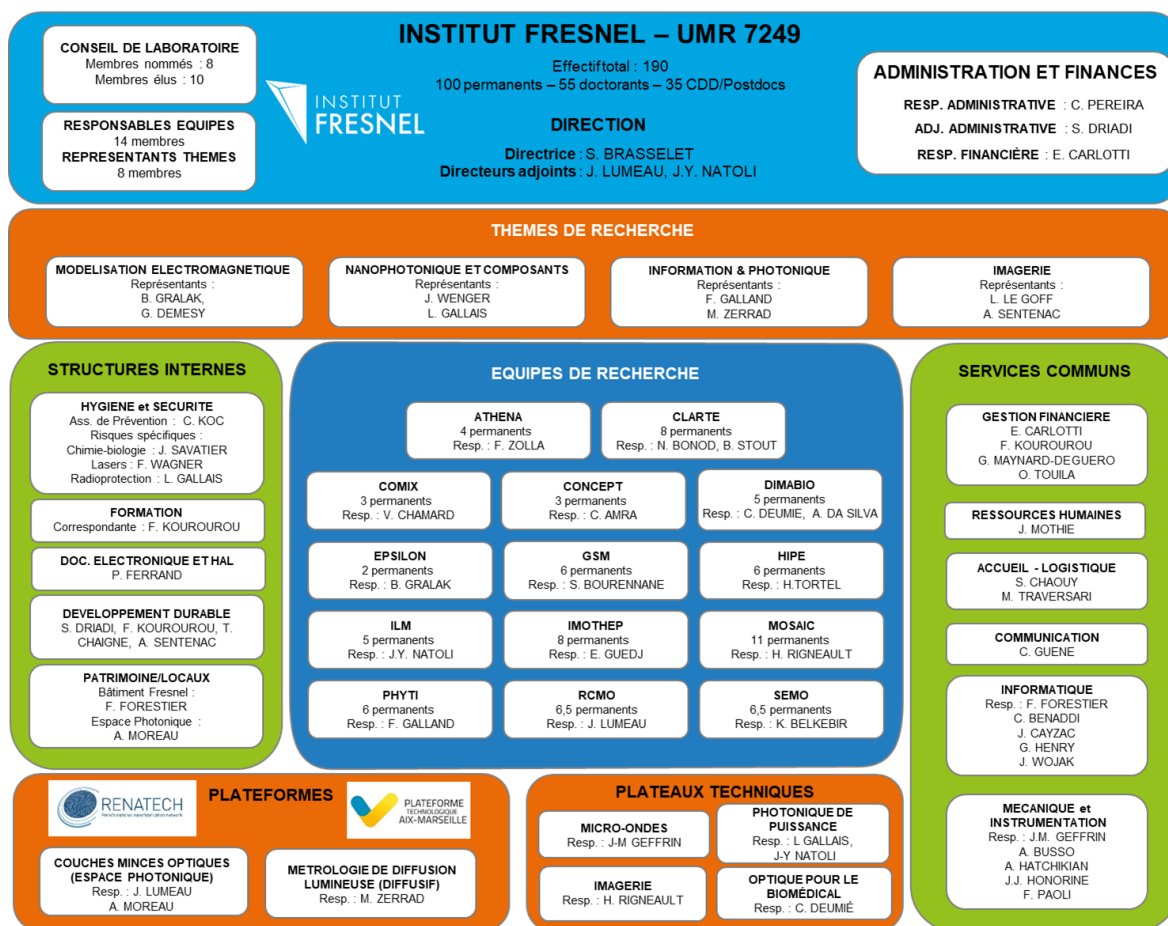
Etat des lieux 2017 – 2019	6
1. Thème Modélisation électromagnétique. <i>Ondes électromagnétiques : modélisation et simulation</i>	7
Introduction.....	7
1.1. Modèles théoriques, numériques et expérimentaux en électromagnétisme	8
1.1.1. Analyse mathématique des systèmes dispersifs et des structures périodiques.....	8
1.1.2 Méthodes numériques pour la diffraction et l'analyse modale.....	9
1.1.3 Simulation expérimentale hyperfréquence	10
1.2. Modèles asymptotiques	10
1.2.1 Equations de Maxwell et optique géométrique.....	11
1.2.2 Equation de transfert radiatif et équation de diffusion	11
1.2.3 Homogénéisation et milieux effectifs	12
1.3. Applications	12
1.3.1 Milieux structurés linéaires en optique.....	12
1.3.2 Milieux structurés non-linéaires en optique	13
1.3.3 Conception de métamatériaux par analogie des équations d'onde	13
1.4. Perspectives.....	13
2. Thème Nanophotonique et Composants.....	15
Introduction.....	15
2.1 Nanophotonique	15
2.1.1 Aspects fondamentaux de la mécanique quantique.....	16
2.1.2 Absorption et diffusion linéaire et non-linéaire de nanostructures	16
2.1.3 Nanostructures diélectriques et théories modales	16
2.2 Antennes optiques et radiofréquences.....	17
2.2.1 Nanoantennes optiques	17
2.2.2 Caractérisation radiofréquence.....	18
2.2.3 Métamatériaux radiofréquences	19
2.3 Couches minces optiques.....	19
2.3.1 Filtres optiques interférentiels à hautes performances.....	19
2.3.2 Composants et concepts innovants	20
2.4 Laser-matière aux forts flux	21
2.4.1 Processus physiques.....	21
2.4.2 Composants optiques pour lasers de puissance	21

2.4.3	Procédés laser	22
2.5	Perspectives.....	22
3.	Thème Information et Photonique	24
	Introduction.....	24
3.1	Téledétection.....	25
3.2	Traitement de l'information et applications	26
3.3.	Communications Optiques pour l'IoT.....	28
3.4	Milieus désordonnés	30
3.5	Perspectives.....	31
4.	Thème Imagerie.....	33
	Introduction.....	33
4.1	Numérique.....	34
4.1.1	Modélisation du lien entre les mesures et l'objet.....	34
4.1.2	Techniques d'inversion pour retrouver l'objet à partir des données	35
4.1.3	Co-conception de l'instrumentation et du traitement numérique	36
4.2	Instrumentation.....	37
4.2.1	Imagerie de phase	37
4.2.2	Imagerie de fluorescence et non linéaire polarisée	38
4.2.3	Imagerie non linéaire	38
4.2.4	Autres contrastes	39
4.3.	Biologie	39
4.3.1	Morphogénèse des cellules et tissus.....	40
4.3.2	Biominéralisation.....	40
4.3.3	Imagerie non-linéaire label-free en Biologie.....	41
4.4.	Médical	41
4.4.1	Biomarqueur et Théragnostique en médecine nucléaire	41
4.4.2	Histologie Raman Cohérent et cartographie chimique sur médicaments	42
4.4.3	Photoacoustique et Thermo thérapie	42
4.4.4	OCT/diffusion sur Cornée	42
4.5	Perspectives.....	42
	Annexe.....	45

Introduction

Ce document destiné au comité externe d'évaluation, a vocation à présenter l'état des lieux scientifique de l'Institut Fresnel entre janvier 2017 (dernière évaluation HCERES) et janvier 2020. Il couvre donc un périmètre plus réduit que celui d'un document d'évaluation HCERES. La précédente visite d'un comité scientifique externe s'est déroulée en septembre 2015 (composition : Rémi Carminati (Institut Langevin), Gilles Dambrine (IEMN), Daniel Dolfi (Thalès RT), Christine Fernandez (XLIM), Frédérique de Fornal (ICB), Christian Jutten (GIPSA-Lab), Philippe Lalanne (LP2N), Hervé Maillotte (FEMTO-ST), Isabelle Sagnes (LPN), Laurent Nicolas (CNRS)).

L'Institut Fresnel (UMR 7249) est une unité mixte AMU, CNRS, Ecole Centrale Marseille, située principalement sur le campus de Saint Jérôme à Marseille mais également sur le campus Santé de La Timone, au CHU (AP-HM) et sur la plateforme CERIMED pour l'imagerie préclinique et médicale. Son activité couvre la physique des ondes de diverses natures, leurs aspects fondamentaux, statistiques et numériques, ainsi que leurs applications dans les grands domaines de l'imagerie et des composants, ainsi que la biologie et le biomedical.



Version:
7 sept. 2020



Lors de sa création en 2000, l'institut Fresnel, comptait 75 membres (dont 50 permanents). En 2015 (visite du précédent comité externe), il comptait 168 personnes (dont 83 permanents). Aujourd'hui ce

sont 190 personnes qui y travaillent (100 permanents, 90 non permanents dont 55 doctorants), avec plus de vingt-cinq nationalités représentées. Parmi les permanents nous comptons 52 Enseignant-Chercheur.e.s, 20 Chercheur.e.s, 6 praticiens hospitaliers, 9 ITA-ingénieur.e.s et 13 ITA administratifs et techniques. A ces chiffres s'ajoutent une cinquantaine de stagiaires que nous accueillons chaque année. Dans le même temps, le budget est passé d'environ 1,2 M€ (dont 160 k€ de dotation annuelle des établissements de tutelle) en 2000 à plus de 5 M€ en 2015 (dont environ 350 k€ de dotation annuelle) et aujourd'hui, près de 7 M€ (dont environ 410 k€ de dotation annuelle). Lors de son premier quadriennal l'Institut Fresnel comptait six équipes. Il a évolué jusqu'à 11 équipes lors de la visite du dernier comité externe en 2015, il compte 14 équipes aujourd'hui.

L'Institut Fresnel a également 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 du développement de l'Institut, création des plateformes Couches Minces et Diffusion en 2017, et enfin création du Master international Europhonics en 2011 (labélisé Erasmus Mundus et A*midex), qui perdure et accueille désormais plus de 25 étudiants par promotion.

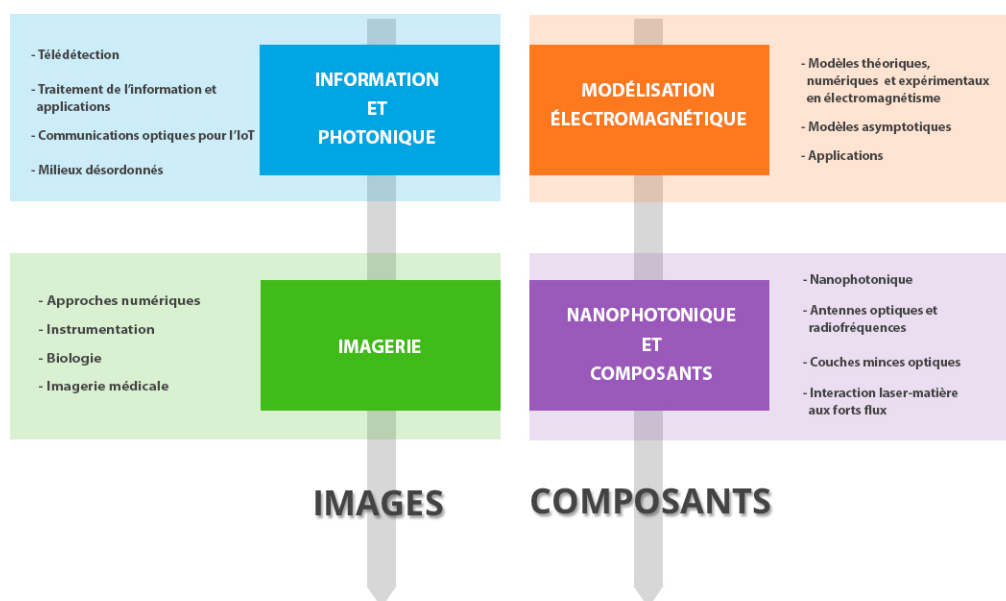
Suite au constat d'une augmentation des effectifs sans modification essentielle de la structure du laboratoire, nous avons lancé en 2015 une réflexion pour que la structure du laboratoire s'organise de manière plus visible autour d'un nombre limité de thèmes scientifiques. Quatre thèmes ont ainsi été créés à l'issue d'un processus de construction collectif de plus d'un an, qui a finalement obtenu une large adhésion du personnel scientifique du laboratoire :

Modélisation électromagnétique : 23 personnels permanents (dont 7 à 100%)

Nanophotonique et composants : 32 permanents (dont 18 à 100%)

Traitement de l'information et ondes aléatoires : 24 permanents (dont 9 à 100%)

Imagerie : 43 permanents (dont 22 à 100%)



Structure des thèmes de l'Institut Fresnel au 1^{er} septembre 2020

Cette structure a été approuvée lors du précédent comité externe en 2015 puis validée lors de la visite HCERES (2017). Les recommandations de l’HCERES étaient essentiellement de consolider cette structure en lui donnant un rôle important dans la politique scientifique du laboratoire.

Ces thèmes sont par définition des structures horizontales, regroupant des personnes d’équipes différentes, certaines personnes se déclarant d’appartenance à plusieurs thèmes. Ils ont le mérite de permettre à tous de bénéficier d’échanges scientifiques (animations, évènements, réunions thématiques) et stratégiques (préparation des évaluations). Suite au changement de direction en Janvier 2020, et dans la lignée de ce qui avait été défini par la précédente direction, nous avons d’ores et déjà consolidé la contribution des thèmes à la politique scientifique du laboratoire, en élargissant davantage leur périmètre d’action (voir Annexe) par leur participation aux définitions des profils de postes lors des demandes de moyens, et à la sélection des projets internes (typiquement 45 k€ distribués annuellement sur projet relevant d’un besoin spécifique). D’autre part, les représentants de thème sont désormais élus par les membres des thèmes et accompagnés d’un(e) adjoint(e), la première élection ayant eu lieu en Janvier 2020. 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. Enfin cette structure ne se substitue pas au rôle des responsables d’équipes qui restent les piliers des aspects opérationnels du laboratoire (gestion financière, présentation des candidats aux postes permanents, CDD et doctorants, demandes initiales de moyens y compris en locaux).

Cette structure a finalement permis de mettre en avant quelques caractéristiques importantes de la nature des recherches menées au laboratoire :

- (1) **Son caractère horizontal** dans 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), jusqu’à des applications en biologie, médicales ou industrielles (instrumentations optiques avancées, métrologie avancée, composants uniques, Tomographie par Emission de Positrons TEP, imagerie par résonance magnétique IRM, ...), en passant par un savoir faire riche en traitement des signaux et des images.
- (2) **Sa capacité à faire évoluer voire à hybrider de manière constructive les aspects du numérique et instrumentaux**, couvrant d’un côté théorie du signal, traitement des images, intelligence artificielle, optimisation, calcul scientifique, simulation et modélisation, et de l’autre fabrication de composants, caractérisation, imagerie et nanophotonique. Cette hybridation accrue des approches et instrumentation, principalement pour la caractérisation et l’imagerie, bénéficie de la présence de deux ingénieurs au service commun informatique en calcul numérique et traitement des images, et fait l’objet d’un projet Equipements Structurants pour la Recherche (Equipex) déposé par le laboratoire en 2020 « Imagerie et Détection par approches computationnelles in situ ».
- (3) **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 commence à porter ses fruits avec un nombre de jeunes chercheurs encadrés grandissant et des collaborations actives. S’est ajouté en 2018 une activité en

imagerie biomédicale avec l'intégration d'une équipe en imagerie TEP implantée que le campus Santé de la Timone (9 permanents AP-HM), 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 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), sur des projets implantés sur la plateforme partenariale CERIMED, Campus universitaire de La Timone.

(4) Son périmètre inter-sectoriel, couvrant de nombreux contrats et collaborations industriels, voire plus récemment de création d'entreprise, mais également pour certains axes, en lien direct avec l'hôpital. L'activité des plateformes Couches Minces Optiques et Métrologie de Diffusion Lumineuse est parfaitement établie et va s'étendre dans le cadre d'un projet de plateforme plus large appelée Photonique, que nous souhaitons mettre en place en 2020-2021 comme détaillé plus bas.

Etat des lieux 2017 – 2019

L'Institut Fresnel a subi quelques modifications importantes depuis 2015, qui contribuent aux évolutions structurelles des prochaines années :

- Extension du rôle des représentants de thèmes et modification de la procédure de leur nomination et révision légère du contour scientifique des thèmes, décrits plus bas.
- Arrivée de 2 biologistes (2015, équipe MOSAIC) et intégration d'une équipe de 9 permanents en imagerie biomédicale (2018, équipe IMOTHEP)
- Arrivée de 2 ingénieurs de recherche dans le service commun informatique (par mobilité CNRS et recrutement AMU) pour le traitement des images et le calcul numérique
- Recrutement de 2 CR CNRS (Maxence Cassier 2018 en Mathématiques appliquées à l'électromagnétisme, Thomas Chaigne 2019 en Imagerie Photo-acoustique pour la biologie)
- Recrutement d'un MCF AMU (Emmanuel Chevallier 2018 en théorie du signal) et un PR ECM (Miguel Alonso 2020 en optique physique, suite à une Chaire d'Excellence A*midex 2018)
- Changement de l'équipe de direction le 1^{er} Janvier 2020

Les directions de recherches suivies actuellement et le projet scientifique de l'Institut Fresnel s'orientent dans un écosystème qui a évolué également :

- La contribution de l'Institut Fresnel à l'échelle marseillaise est marquée par son implication importante dans les instituts d'Etablissement : « Marseille Imaging » (en imagerie biologie et biomédical, institut dont la structure s'est créée avec l'institut Fresnel en tant qu'acteur majeur et dont le Directeur est Stefan Enoch, précédent directeur de l'institut Fresnel), et « AMUTech » (en nanosciences) essentiellement, mais également par son recouvrement très fort avec les instituts MarMaRa (médical), Archimède (mathématiques-informatique), ISFIN (Institut des Sciences de la Fusion et de l'Instrumentation en Environnements Nucléaires), et Intelligence Artificielle pour la santé.
- L'activité du laboratoire s'ouvrant vers les utilisateurs extérieurs est grandissante, d'une part dans les axes déjà très actifs en couches minces (composants, caractérisation) et métrologie optique (diffusion, interaction laser-matière), mais également en imagerie et caractérisation. Le nombre de

demandes académiques et industrielles sont souvent supérieures à nos possibilités actuelles, alors qu'elles participent de manière indirecte aux développements d'axes de recherche nouveaux. Ce constat nous amène à élargir le périmètre des plateformes existantes (couches minces optiques et diffusion) et des plateaux techniques (Biophotonique, Photonique de puissance, Micro-ondes, Optique pour le biomédical) pour les unifier, pour plus de visibilité, sous une même plateforme globale 'Photonique'. Cette plateforme fait l'objet d'une prochaine demande de labellisation Aix Marseille Université/CNRS et, pour la partie imagerie/caractérisation, d'un dépôt de projet CPER (2020), porté par l'Ecole Centrale Marseille, où s'y trouvent représentés les savoir-faire recherche, formation et valorisation du laboratoire et de l'ECM (un nouveau financement CPER étant déjà validé pour la partie couches minces optiques). Cette plateforme possèdera ainsi les outils récents les plus matures développés à l'Institut Fresnel, qui répondent aux besoins grandissants en imagerie et caractérisation de matériaux. Cette démarche de création de plateforme, outre une visibilité accrue, est essentielle pour assurer le rayonnement et la continuité de certaines de nos activités, mais aussi pour en faire bénéficier l'ensemble de la communauté industrielle et académique.

Enfin en terme de production scientifique, l'Institut Fresnel a publié 111 (2017), 113 (2018) et 136 (2019) publications dans des revues internationales à comité de lecture pendant la période 2017-2019, dont certaines dans des revues à très fort impact (Nat. Materials, Nat. Communications, Light: Science & Applications, Optica, ...). 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 du laboratoire.

1. Thème Modélisation électromagnétique. Ondes électromagnétiques : *modélisation et simulation*

Introduction

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 25 membres permanents de l'Institut Fresnel participant à ces activités de recherche sont des ingénieurs-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. Sur la période 2017-2019, 10 doctorants et 3 post-doctorants ont également contribué à ces activités de recherche.

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 3 années 2017-2018-2019, 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 ; 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 2017-2019, la production scientifique associée à ce thème est de 60 articles et de 30 présentations invitées dans des conférences internationales. Ces travaux ont été soutenus par 6 projets financés par l'ANR et 1 projet financé par l'IdEx 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, LAAS, LCF, FEMTO-ST, Institut Langevin, ISCR...).

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 2017-2019 : 2 *workshops* du GT1 du GDR Ondes sur la modélisation des ondes à Paris et à Marseille, 1 *workshop* de l'IRN PHOTONET sur la photonique à Wuhan 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.

1.1. Modèles théoriques, numériques et expérimentaux en électromagnétisme

1.1.1. 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 [Cas2017a].

Par ailleurs, les résultats obtenus ont notamment mis en évidence l'équivalence entre les principes

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

Théorème de représentation de Hergotz-Neumanlinna de la permittivité d'un milieu causal et passif [Gra2017,Cas2017b].

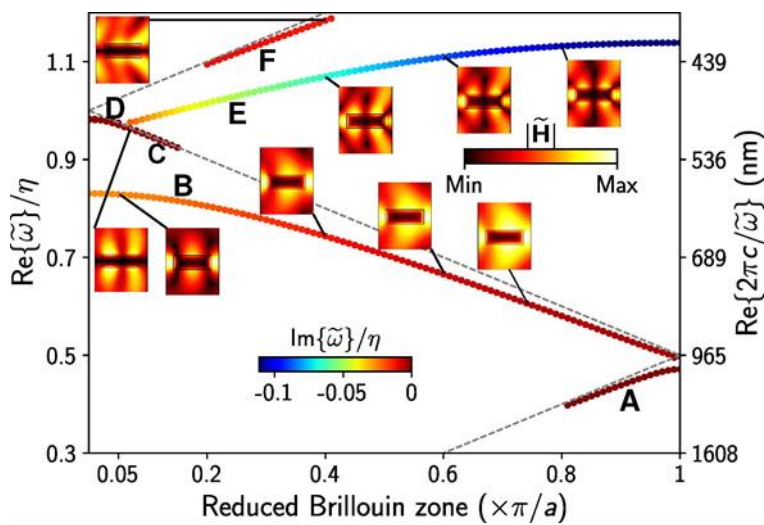
physiques de la causalité et de la passivité et les propriétés analytiques des grandeurs physiques : la fonction de Green électromagnétique [Gra2017], les relations de dispersion dans les structures périodiques [Gra2018] et la permittivité [Cas2017b]. Ces propriétés ont permis d'exploiter la représentation de Herglotz – pouvant être

considérée comme une généralisation des relations de Kramers-Kronig – pour établir des relations fondamentales concernant la permittivité [Cas2017b] et les limites de l’invisibilité avec des systèmes passifs [Cas2017c]. 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 [Abd2018a] qu’en régime fréquentiel [Abd2018b] : dans ces modélisations, la dispersion, la causalité et l’analyse complexe garantissent l’absence de croissance exponentielle, la régularisation et la complétude des modes.

1.1.2 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 [Feh2017] (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 » [Els2017a, Els2017b] (cf §1.3.2).

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 [Gar2017]. Nous avons mis au point plusieurs stratégies de linéarisation compatibles avec les éléments finis pour le calcul des modes quasi-normaux (QNM) en présence de dispersion. Un modèle open-source pour les problèmes

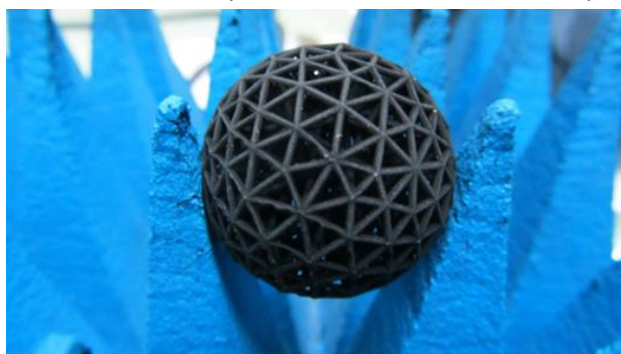


Fréquences de résonances complexes et modes quasi-normaux associés.

aux valeurs propres dits non-linéaires résultant de cette prise en compte de la dispersion a été mis au point 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) [Dem2020]. Ces modèles ont fait l’objet d’un travail conséquent de *benchmark* impliquant plusieurs méthodes alternatives et équipes internationales spécialistes du sujet [Lal2019]. Enfin, des formules très générales d’analyse modale ont été introduites [Zol2018] en s’appuyant sur le théorème de Keldysh.

1.1.3 Simulation expérimentale hyperfréquence

L'analogie micro-onde développée à l'Institut Fresnel permet, par un changement d'échelle gardant un rapport constant 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 de ces « analogues » est donc plus facilement maîtrisable 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) [Bar2018], [Bar2017], [Sal2017]. 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 [Bar2018a] ; un effet de commutation parfait en fonction de la polarisation résultant de l'interaction électrique (ou magnétique) mutuelle entre deux particules haut-indice [Bar2017] ; la combinaison de méta-atomes haut-indice à résonance dipolaire magnétique unique pour produire des facteurs de qualité infinis et des effets de transparence [Abu2019] ; un concept de source d'Huygens large bande [Abd2019].



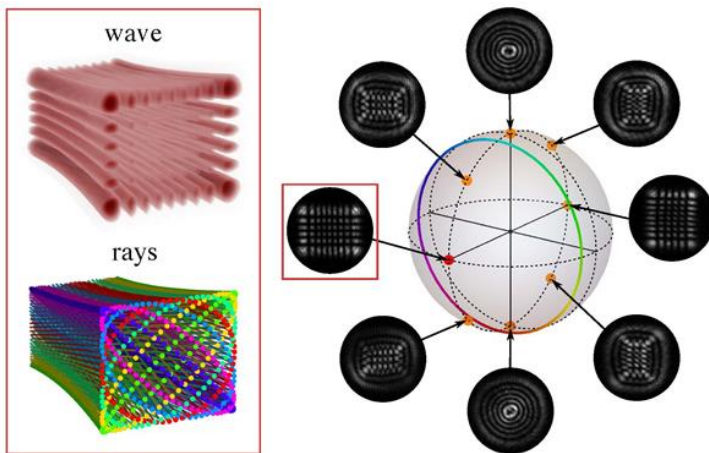
Sphère composite à l'échelle millimétrique pour simuler une sphère diélectrique de bas indice en optique.

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 [Het2019] ou l'interaction d'une onde électromagnétique avec des comètes (voir le thème *imagerie*) ou des particules proto-planétaires.

1.2. Modèles asymptotiques

En compléments 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 [Sze2017, Sze2018, Sze2019] et un modèle de petites particules polarisables pour l'imagerie [Cas2017d, Bar2018b] ne sont pas présentés ci-après.

1.2.1 Equations de Maxwell et optique géométrique



Modélisation des ondes électromagnétiques par des faisceaux auto-similaires.

Grâce au formalisme des faisceaux gaussiens généralisés, nous avons exploré les frontières entre l'électromagnétisme et les rayons optiques [Alo2019]. 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

[Mal2018, Gut2019]. 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].

1.2.2 Equation de transfert radiatif et équation de diffusion

L'approximation de diffusion est couramment appliquée à l'équation de transport radiatif (ETR), en

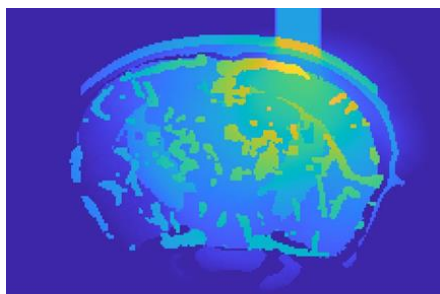


Image d'un cerveau de souris.

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 [Tri2018a]. 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 [Tri2018b]. Ces méthodes sont appliquées à l'imagerie dans les tissus vivants (voir le thème « Imagerie »).

1.2.3 Homogénéisation et milieux effectifs

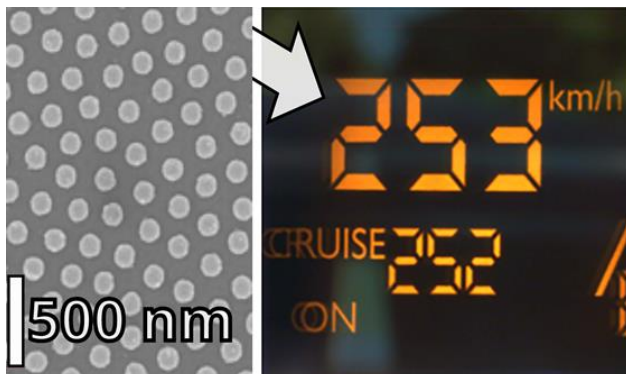
Des modèles d'homogénéisation ou de milieux effectifs sont élaborés à l'Institut Fresnel pour modéliser de façon simple des structures hétérogènes, généralement périodiques, afin de prédire leurs propriétés ou de concevoir des composants. Des systèmes variés ont fait l'objet d'études : une théorie de la permittivité effective pour les réseaux métalliques [Pop2018] ; l'homogénéisation dite « hautes-fréquences » a été appliquée en élasto-dynamique pour mettre en évidence une anisotropie extrême [Lef2017] ; 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 [Mau2018] ; l'homogénéisation de structures quasi-périodiques issues d'une coupe et projection de structures périodiques dans un espace de dimension supérieure [Wel2017] ouvre une voie originale vers des métamatériaux mécaniques isotropes aux basses fréquences.

1.3. 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.

1.3.1 Milieux structurés linéaires en optique

La combinaison de notre code maison basé sur la méthode modale de Fourier avec un algorithme d'optimisation (voir §1.1.2) nous a permis de proposer une structure originale pour le filtrage en transmission accordable en fonction de l'angle d'incidence [Feh2017]. Par ailleurs, nous avons



Conception et réalisation d'un prototype de système d'affichage optique pour l'industriel Groupe PSA (La lettre innovation du CNRS, septembre 2018 et [Ber2018])

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 [Nap2019].

Les connaissances en modélisation théorique (indices effectifs, §1.2.3) et numérique (méthode modale de Fourier et éléments finis, §1.1.2) 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 [Ber2018]. 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).

1.3.2 Milieux structurés non-linéaires en optique

La nouvelle méthode numérique de calcul des modes non-linéaires [Els2017a, Els2017b] (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 [Els2018]. 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 μm [Kur2017]. Nous avons aussi poursuivi le développement de la modélisation (méthode modale de Fourier, éléments finis et méthode des dipôles couplés) de structures longues de plusieurs centaines de longueurs d'onde, structurées à l'échelle de la longueur d'onde et fortement résonantes [Sen2017] pour montrer la possibilité de générer des effets non-linéaires du second ordre (génération de seconde harmonique) [Ren2019].

1.3.3 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 [Dup2017] et la protection des bâtiments dans les bassins sédimentaires [Bru2019]. Cette thématique était soutenue par un financement européen ERC entre 2011 et 2016.

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-amino a été proposée pour le contrôle de la diffusion de drogues [Puv2019] 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 [Hui2019]. 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.

1.4. Perspectives

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 [Gra2018]. Des travaux seront également effectués pour proposer des preuves rigoureuses de développement sur les modes de résonances (ou QNM) d'existence de points de Dirac et d'isolants topologiques, 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 (Salt Lake City) pour la modélisation des structures composites au moyen des fonctions de Herglotz [Cas2017c] et avec Michael Weinstein de l'université de Columbia à New York pour l'étude mathématique des isolants topologiques [M. Cassier and M. I. Weinstein, *High contrast honeycomb elliptic operators*, en préparation].

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.

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.

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 [Hui2019] 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-temporel (dispersion, causalité) et caractériser finement les nouvelles propriétés de ces structures spatio-temporelles.

2. Thème Nanophotonique et Composants

Introduction

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. Pour mener ces activités, l'Institut Fresnel s'appuie sur l'Espace Photonique regroupant 250 m² 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.

Sur la période 2017-2019, le thème a fédéré de 19 enseignants-chercheurs ; 8 chercheurs ; 5 techniciens, ingénieurs et autres personnels, pour un équivalent temps plein par an de 16.25 ETP/an. 31 doctorants et 14 post-doctorants ont été accueillis.

En trois ans, la production scientifique s'élève à 113 publications dans des revues internationales à comité de lecture (RICL), ce qui équivaut en moyenne à 37,7 RICL par an et 2,3 RICL/ETP/an. La liste détaillée des publications du thème est fournie en annexe. 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 de 3 ans, 9 articles ont été publiés dans des revues de facteur d'impact supérieur à 10. Sur l'ensemble de nos publications, le facteur d'impact moyen est de 4,5 tandis que le facteur d'impact médian est de 3,6 (la moitié de nos publications se classent dans des revues de facteur d'impact supérieur à 3,6).

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.

2.1 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.

2.1.1 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 [dAm19]. 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, fonctions de Green QED, quasi-normal modes [Las18], couplage fort [Bra18].
- *Aspects fondamentaux de la théorie quantique* : tests d'effets gravitationnels [Col17] et/ou de non-linéarités dans le régime quantique, équilibre quantique [Hat18].
- *Nouvelles technologies quantiques* : information quantique, communication quantique, cryptographie quantique, générateurs quantiques/photoniques de nombres aléatoires [Car17].

2.1.2 Absorption et diffusion linéaire et non-linéaire 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.

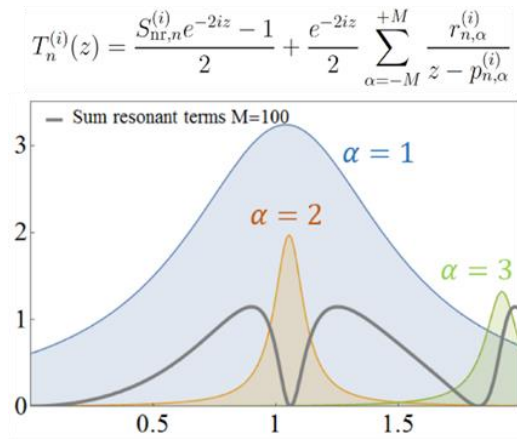
Les nanostructures métalliques ont permis de contrôler la diffusion de la lumière, incidente ou harmonique, soit au sein de nanoparticules individuelles en mouvement [Ber19] soit au sein de nanostructures plus complexes telles que les métasurfaces, pour encoder de l'information [San18].

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 au sein des nanostructures a été utilisée pour chauffer de manière très localisée spatialement, soit au sein de nano trous [Jia19] soit au sein de structures plus complexes afin d'obtenir des profils de température à façon aux échelles micrométriques [Dur19,Kha17]. 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].

2.1.3 Nanostructures diélectriques et théories modales

L'objectif de ces recherches est d'analyser et d'utiliser les résonances électromagnétiques dans des nanostructures diélectriques à haut indice de réfraction.



Spectre de diffusion d'une particule de silicium: contribution des 3 premiers modes dipolaires.

Dans le cadre d'une collaboration avec l'Institut Langevin et l'INSP, nous avons démontré une manipulation des transitions dipolaires électriques ou électriques d'ions europium par l'intermédiaire des résonances magnétiques d'une antenne en silicium [San18] et avons utilisé un algorithme génétique afin de maximiser le champ proche magnétique [Bon19].

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].

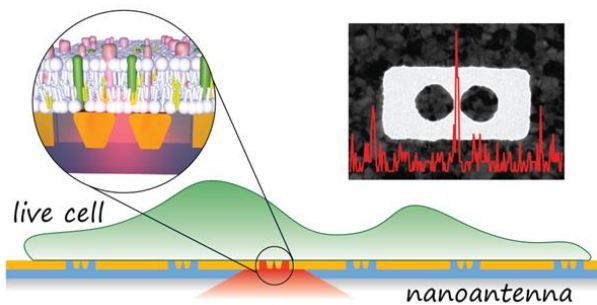
Nous avons montré comment étendre ces expansions modales au domaine temporel en résolvant le problème de divergence [Col18]. Un intérêt particulier a été porté sur le lien entre le renforcement du champ à l'intérieur de la structure diélectrique et les pics de diffusion observé en champ lointain [Sto17, 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]. 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].

2.2 Antennes optiques et radiofréquences

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

2.2.1 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. Sur la période 2017-2019, trois domaines de recherche ont été développés.



Nanoantenne optique pour sonder les membranes cellulaires.

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 µs

[Reg17,Win17,Win18]. Ces travaux ont été menés dans le cadre d'un projet européen FP7-ICT en partenariat avec IFCO et l'EPFL.

Le second axe de recherche porte sur le contrôle de l'interaction dipôle-dipôle par des nanostructures photoniques. 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]. Nous avons également développé une analogie avec le domaine des micro-ondes pour réaliser la première cartographie de transfert d'énergie entre dipôles en champ proche [Rus19].

Enfin, le troisième et dernier axe concerne l'étude de nanostructures résonantes en aluminium. 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 [Bar19a] et ont notamment permis de mettre en évidence la détection de protéines sans marquage [Bar19b].

2.2.2 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]. 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.

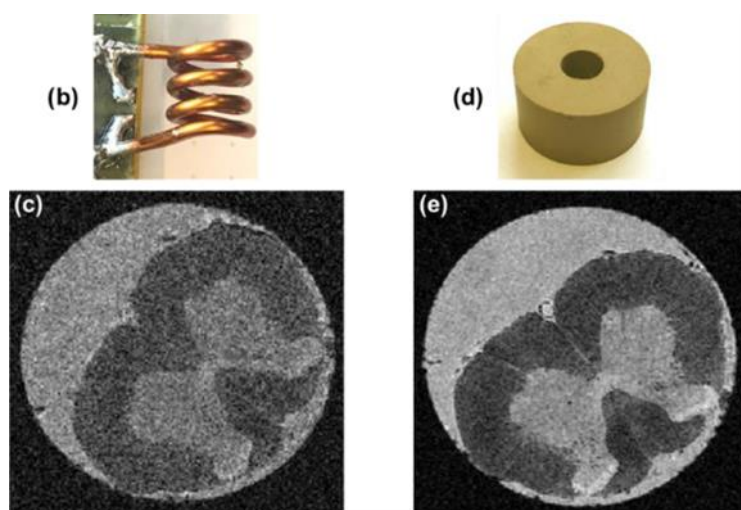
Enfin, nous avons étudié des matériaux à très hauts indices pour des applications à l'imagerie IRM à très hauts champs. Les matériaux furent d'une part, des mélanges aqueux avec des poudres de pérovskites compressées [Nev17] et d'autres parts, des matériaux artificiels et analogues à des tissus biologiques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

2.2.3 Métamatériaux radiofréquences

Depuis 2017, nos travaux sur les métamatériaux radiofréquences (RF) sont centrés autour de la problématique des antennes RF en IRM, et plus principalement autour de deux axes principaux : (1) l'homogénéisation du champ RF d'excitation sous contrôle de l'absorption dans les tissus 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.

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 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 [Dub18]. 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. Nous avons



Antenne céramique (à droite) pour l'amélioration du rapport signal sur bruit en imagerie IRM.

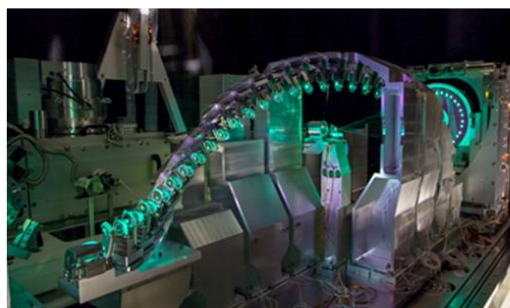
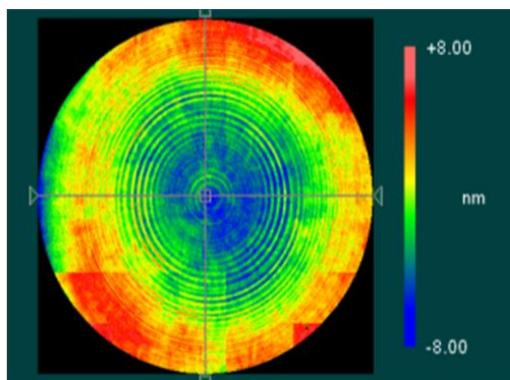
développé une nouvelle génération d'antenne IRM diélectrique basée sur l'excitation de résonateurs céramiques. Nous avons démontré sur un IRM petit animal que pour une même durée d'examen, nous pouvons au moins doubler le rapport signal à bruit [Mou19]. Ces activités ont été menées dans le cadre du projet européen MCUBE et de trois projets financés par l'Institut Carnot Star.

2.3 Couches minces optiques

2.3.1 Filtres 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. Sur la période 2017-2019, trois

domaines de recherche ont été développés. Le premier concerne les propriétés mécaniques de couches à savoir les contraintes. Ces dernières jouent un rôle crucial dans les performances finales des filtres fabriqués puisqu'elles vont les déformer et entraîner des déformations des fronts d'ondes réfléchis par ces composants. Nous avons développé des méthodes de mesures précises de ces contraintes (précision de ± 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



Exemples de miroirs ultraplats développés dans le cadre du projet ELI-NP.

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 les 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]. 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].

2.3.2 Composants et concepts innovants

Si les filtres hautes performances permettent un contrôle spectral de la lumière, pour aller plus loin, de nouvelles générations de composants innovants sont à l'étude. Ainsi, les travaux portant sur le développement de structures multi-diélectriques planaires et résonantes proposent une alternative à la plasmonique en permettant, en condition de réflexion totale interne, de générer des exaltations géantes (plusieurs décades) du champ électrique. On s'appuie ici sur la notion d'admittance nulle [Amr18]) et les avancées réalisées sont de nature théoriques pour définir des techniques de synthèse analytique, numériques pour intégrer les conditions d'utilisation dès la synthèse des composants et expérimentales pour en quantifier les performances [Ler17,Zer17,Amr18,Ler19,Niu19]. Les applications visées touchent la microscopie à fort contraste ou les capteurs ultrasensibles pour lesquels les détectivités mesurées en milieu liquide [Niu19] dans le cadre des travaux de l'OpenLab PSA Groupe/AMU ont déjà rejoint l'état de l'art.

Une autre évolution vise la 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, en collaboration avec

la société Multiwave, de métasurfaces optiques à gradient de phase [Mik19] ou de filtres passe-bande à longueur d'onde transmise spatialement contrôlée [Bou19].

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].

2.4 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.

2.4.1 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 sur la période 2017-2019 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], 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], 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 [Ras18].

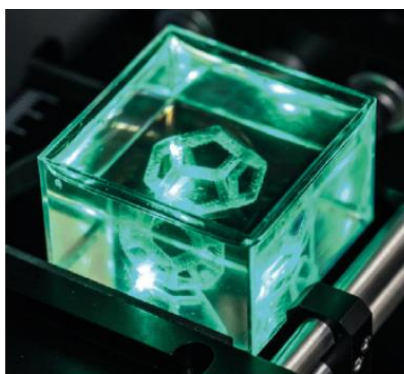
2.4.2 Composants optiques pour lasers de puissance

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 (LULI) [Her17], Miroirs de transport pour le laser PETAL (CEA) [Cho18,Cho19,Oll19,Soz17], Optiques en silice pour le laser LMJ (CEA) [Vei18,Lam19,Tou19], Systèmes

embarqués pour le spatial (CNES) [Wag18,Geb18], Couches minces à faible absorption [Liu17], nouveaux concepts de miroirs basés sur des structures à puits quantiques (LZH) [Wil17].

2.4.3 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



Système d'impression 3D laser rapide.

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]. Les travaux menés sont fortement liés aux applications avec des retombées en termes de valorisation et de transfert (4 brevets et un projet de maturation à la SATT SE).

2.5 Perspectives

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.

Nanophotonique

Les perspectives d'avenir pour les aspects fondamentaux en mécanique quantique concernent la conception de nouveaux tests fondamentaux 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 (début septembre 2020), 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 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 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 dépôt avec PSA Groupe pour la réalisation de nez optiques et la qualification des capteurs correspondants en milieu gazeux. Une thèse est aussi en cours sur l'application de composants optiques résonants en microscopie TIRF exaltée. 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 métasurfaces optiques.

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. 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.

3. Thème 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 2017-2019, le thème *Information & Photonique* a fédéré 16 enseignants-chercheurs, 3 chercheurs, 3 ingénieurs, 1 praticien hospitalier et 1 physicien médical, pour un équivalent temps plein moyen d'environ 8.2 ETP/an. Il a généré 61 publications dans des revues internationales à comité de lecture ainsi que 2 brevets. Sur la période, 33 doctorants et post-doctorants 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'IoT,
- 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 *Modélisation Electromagnétique* apparaissent également à travers le développement de nouvelles approches et de nouveaux moyens expérimentaux pour l'étude des milieux désordonnés.

3.1 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 qui fait partie des thématiques de recherche de l'Institut Fresnel depuis de nombreuses années. Les travaux effectués relèvent des défis méthodologiques et applicatifs tout particulièrement dans le domaine du traitement d'images issues de la télédétection hyperspectrale, celle-ci 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, Fos18, 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].

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 [Liu18], nous avons proposé une méthode non-supervisée pour la classification en imagerie hyperspectrale. Cette méthode est basée sur l'apprentissage par transfert 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 [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 une variabilité spectrale dans les modèles utilisés pour l'inversion. 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, ...).

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.

3.2 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 la nouvelle équipe IMOTHEP et 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

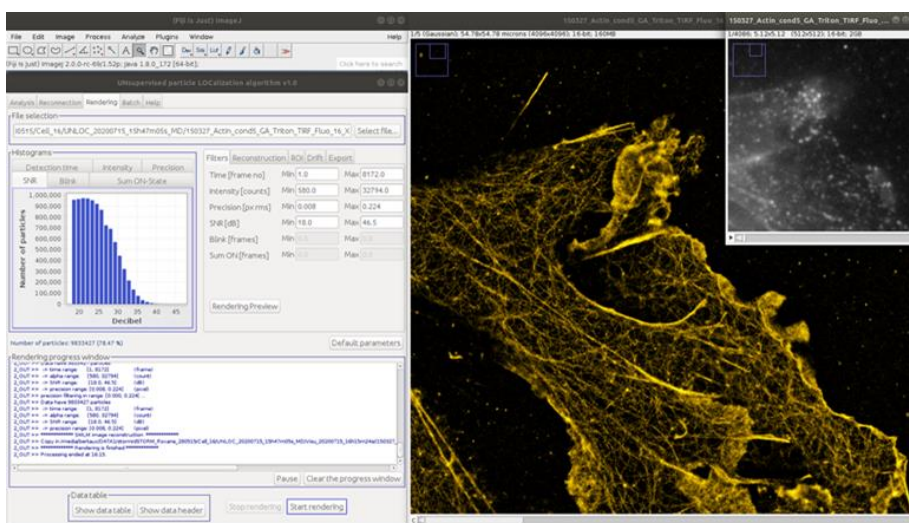
intérêt particulier aux méthodes à base de réseaux de neurones profonds à des fins de débruitage, de segmentation et de classification dans l'objectif d'un développement de méthodes d'aide au diagnostic assisté par ordinateur.

Nous avons également travaillé sur les signaux d'électroencéphalogramme (EEG), et nous avons proposé une méthode [Rid17] pour caractériser, identifier et classer 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.

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 plus méthodologiques sur ce sujet ont permis de caractériser précisément les performances de la technique « Raman comprimée » 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 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 aussi 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



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

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.

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 [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.

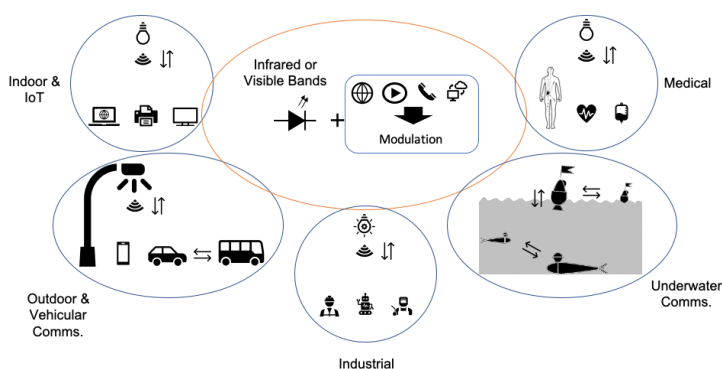
Parallèlement, plusieurs travaux ont porté sur le traitement de signaux physiques pour la tomographie. Ainsi, dans [Dan19, Dar19] nous avons développé des techniques pour la reconstruction de la tomographie de la conductivité électrique en proposant des solutions au problème inverse associé. Pour la validation de nos travaux, nous avons mis au point une nouvelle stratégie d'excitations simultanées et orthogonales de tomographie par impédance électrique. Dans [Fos18], 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.

3.3. 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, 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), la télésurveillance médicale (smart healthcare), etc. Ces applications nécessitent une fiabilité élevée, une faible latence, et une faible consommation d'énergie, et doivent pouvoir gérer 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, de la RF 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 (M.A. Khalighi et al., "IEEE Communications Surveys & Tutorials").

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 est une solution à faible coût 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]. Nous avons également étudié 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 un futur réseau 5G, par exemple. 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 depuis 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, nous avons travaillé sur les solutions efficaces d'accès multiples pour les réseaux LiFi cellulaires. Un autre volet a consisté en l'étude de caractérisation du canal optique pour les réseaux corporels avec les connexions VLC ou infra-rouge dans un contexte hospitalier. Ici, nous avons également étudié les techniques de transmission d'accès multiple à faible complexité pour assurer les transmissions simultanées de plusieurs utilisateurs portant chacun des capteurs multiples.

Enfin pour les systèmes UWOC, nous nous sommes concentrés 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, Kha19]. Ces composants s'avèrent très prometteurs pour la mise en place des réseaux sans-fil sous-marins à haut-débit et à faible consommation énergétique. Le développement des schémas de

transmission appropriés pour ces composants, la prise en compte des erreurs d'alignement du faisceau, et la conception des systèmes robustes aux erreurs de pointage, font partie des travaux les plus récents qui ont été réalisés en collaboration avec l'IFREMER et l'Université McMaster du Canada.

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 techniques proposées.

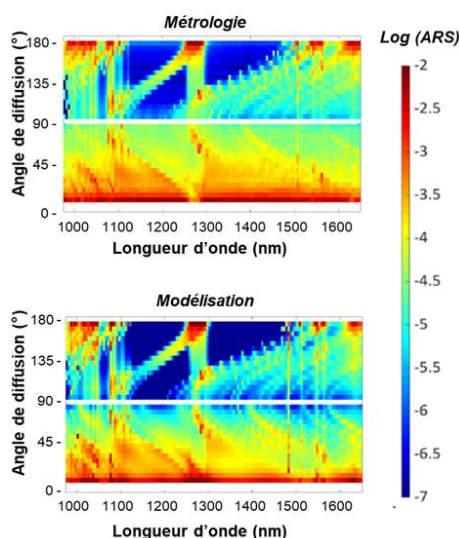
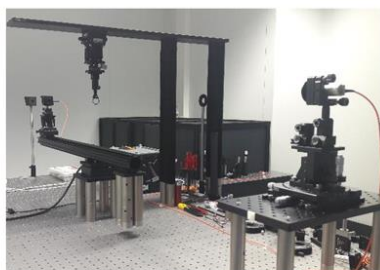
3.4 Milieux désordonnés

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 Simulations 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 [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 (≈ 1000 couches), et 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]. 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] et de nouveaux concepts

de diffusomètres originaux ont été déposés [Amr18]. L'ensemble de ces résultats a permis à l'Institut d'être sollicité pour représenter la France dans les comités ISO normalisant, à l'échelle internationale 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.



Instrument SALSA et nappes de diffusion calculées et mesurées sur un filtre complexe (> 100 couches)

Ces travaux 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], 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], thème émergent de l'activité, récemment enrichi d'une extension des travaux au régime Téra-Hertz [Pou18] pour une analyse des tissus à l'échelle de la feuille.

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 8 CDDs.

3.5 Perspectives

Pour les activités en Télédétection, 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'importante variabilité spectrale 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.

Dans l'axe Traitement de l'information et applications, nous poursuivrons nos travaux portant sur l'aide au diagnostic assisté par ordinateur pour l'imagerie médicale, avec un effort particulier mis sur l'apprentissage automatique et les méthodes issues de l'intelligence artificielle.

En microscopie pour la biologie, nous continuerons nos travaux en imagerie STORM. Nous axerons également nos efforts sur les systèmes de microscopie non conventionnels dans des configurations qui requièrent de travailler à faible nombre de photons (en particulier en spectroscopie Raman comprimée, ainsi qu'en microscopie confocale 3D à balayage adaptatif pour la drosophile), nécessitant la mise en œuvre d'approches théoriques et d'outils de traitement des données dédiés.

Nos activités en biométrie utilisant des modèles tensoriels et innovants seront poursuivies, l'objectif visé 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.

De plus, le développement de techniques d'analyses statistiques pour une application en astronomie portant sur l'étude du milieu interstellaire est également en cours de développement.

Dans l'axe Communications optiques pour l'loT, nous allons poursuivre nos recherches sur la technologie d'optique sans-fil pour répondre aux besoins des futurs réseaux de communication B5G (Beyond 5G). 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, à plus long terme, les étendre aux liaisons longues portées, en particulier, entre les microsattellites. De telles liaisons pourront servir de liens « backhaul » pour un réseau B5G. 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. 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'loT sous-marin, nous poursuivrons nos activités sur les techniques UWOC, notamment dans le but d'améliorer la portée de ces liaisons, ainsi que leur robustesse dans les scénarios dynamiques.

Ces recherches bénéficieront d'une forte collaboration internationale. En particulier, en plus du projet VisIoN qui se poursuivra jusqu'à fin 2021, nous allons piloter l'action COST NEWFOCUS sur la technologie d'optique sans-fil pour les futurs réseaux de télécommunications (démarrage sept. 2020) qui sera une merveilleuse opportunité pour mettre en place de nouveaux projets collaboratifs.

Dans l'axe Milieux désordonnés, nous continuerons d'étudier les corrélations dans les champs ondulatoires, électromagnétiques (classiques) ou quantiques. Le dénominateur commun à ces études sera l'utilisation de descriptions géométriques qui mettent en évidence les symétries naturelles du problème physique à l'étude, comme le fait par exemple la sphère de Poincaré pour la polarisation des champs paraxiaux. Un cas particulier qui sera étudié est celui de la polarisation des champs optiques non paraxiaux. Au-delà d'un intérêt théorique avéré, cette description sera également utile pour des applications en microscopie. Enfin, on s'intéressera à l'analogie avec l'intrication quantique, pour voir

comment ces descriptions géométriques peuvent être utilisées pour classer les états multipartites.

Les études sur les milieux fortement désordonnés sont déjà en cours d'extension à l'analyse des milieux biologiques et des végétaux. Des outils utilisant les signatures statistiques des speckles diffusés (dynamiques, spatiaux, spectraux) pour discriminer les types de mélanomes seront mis en œuvre avec le soutien de l'INSERM et l'ONERA (projet ESCAPADS). On finalisera le développement d'outils de reconstruction (reverse engineering) de la structure interne des feuilles de tournesol à partir de signaux THz temporels, en vue d'identifier les signatures représentatives de leur capacité à résister au stress hydrique (projet ANR OPTIPAG). Les efforts porteront également sur la métrologie THz récemment introduite (projet RAPID/AID).

Par ailleurs, de nouveaux projets démarrent pour construire un diffusomètre sans mouvement (ANR FIRST) couplé à des algorithmes de reconstruction de phase, avec pour but de reconstruire la topographie des surfaces à partir d'une simple mesure d'intensité. Les travaux théoriques, numériques et instrumentaux visant à un meilleur contrôle des pertes des composants optiques hautes performances prendront une nouvelle ampleur en analysant de façon spécifique les problématiques de chacun des interféromètres terrestres et stellaires conçus pour la détection des ondes gravitationnelles en Europe. Les travaux en cours sur le LISA seront complétés par des collaborations naissantes sur Virgo et l'Albert Einstein Telescope. A noter également les études qui ont démarré pour réduire les pertes par diffusion en s'appuyant sur une synthèse par apprentissage profond. Enfin, les travaux théoriques (illusions & invisibilité, transformations d'espace) portant sur le mimétisme de la chaleur (projet ANR INPACT) par conduction et rayonnement [Alw17a, Alw17b] ont permis d'étendre les contraintes de rayonnement à de nouvelles applications notamment liées au filtrage optique. Nous envisageons à terme de compléter la plateforme de diffusion lumineuse DIFFUSIF par des analyses de rayonnement thermique. Ces études seront finalisées dans le cadre du LABTOP. Pour conclure, soulignons que les financements sont déjà acquis pour une majorité de ces perspectives.

4. Thème Imagerie

Introduction

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 pour être sensible à l'absorption, la phase ou au tenseur de polarisabilité, à la fluorescence à 1 ou 2 photons, au tenseur de susceptibilité non-linéaire. Ces développements se déclinent également en endoscopie, pour une transposition dans le contexte clinique. Les systèmes que nous développons reposent sur les compétences que le laboratoire cultive depuis des années, en modélisation, analyse numérique et instrumentation. L'institut 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. Une équipe de médecins fait aussi partie de l'Institut Fresnel et développe des recherches sur l'imagerie PET (positron emission tomography) pour la détection et le suivi des pathologies.

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 de nouveaux instruments sensibles à de nouveaux contrastes
- Biologie : l'étude du vivant, champ d'application de l'imagerie
- Médical : les applications de l'imagerie à la médecine

Sur la période 2017-2019, le thème *Imagerie* a fédéré 21 enseignants-chercheurs, 12 chercheurs, 5 ingénieurs, 7 praticiens hospitalier et 1 physicien médical, pour un équivalent temps plein moyen d'environ 23.4 ETP. Il a généré 101 publications dans des revues internationales à comité de lecture ainsi que 5 brevets. Les membres du thème ont participé à l'organisation de plusieurs conférences et écoles d'été : Cohérence (2016, Saint-Malo) PEP2018 (Porquerolles, 2018), celltiss-approches quantitative du vivant (Giens, 2019, 150 participants), Mathematical and numerical approaches for multi-wave inverse problems (Marseille, 2019), MiFobio (avec une implication dans l'organisation de cette école bio-annuelle depuis 15 ans, qui regroupe aujourd'hui près de 350 participants).

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 le groupe de G. Forbes (Forbes, Macquarie University, Australia), nous nous appuyons sur une analyse des rayons pour analyser la détérioration des images induite par des erreurs de fabrication des appareils d'imagerie a été analysée dans [Ham19, Lia19a, 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 [Akh17].

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 (ANR L-iOS), 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, Cal17]. 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 collimatés a été modélisé. Ce modèle a ensuite été utilisé pour développer une méthode de tomographie champ large computationnelle, *ptychoCARS* [Heu19], 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].

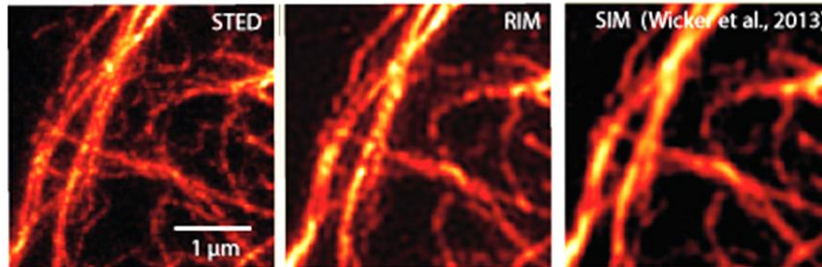
Enfin sur un terrain plus fondamental, en collaboration avec l'Institut Carnot de Bourgogne, nous avons mis en évidence les analogies spatio-temporelles frappantes qui existe entre la diffraction et la dispersion [Aud20] [Bos18] et introduit la notion de tâche d'Arago (ou tâche de Fresnel) dans le domaine temporel [Fin19].

4.1.2 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 réciprocité 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, Her18].

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 éclairagements. Nous avons développé une méthode originale basée sur des éclairagements de speckles inconnus, appelée *Random Illumination Microscopy (RIM)*. La reconstruction numérique dans cette méthode est basée sur une analyse statistique des images [Lab17, Id18, Neg18, Neg19]. L'algorithme 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,Sha17]. Cette méthode, qui montre un gain de résolution robuste même en profondeur dans l'échantillon en présence d'aberrations, est en cours de validation auprès de partenaires en biologie pour l'imagerie tissulaire et de sphéroïdes (T Mangeat, Centre de Biologie Intégrative Univ. Toulouse).

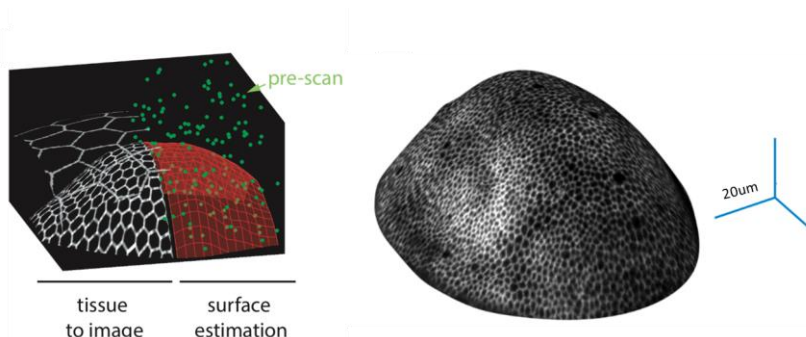


Comparaison sur le même échantillon (F-actine marquée en cellule de culture) des performances du RIM (au centre) et de deux systèmes commerciaux de super-résolution.

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, bra19, VEL19]. En lien avec l'activité en biologie des tissus (voir plus bas), nous développons de nouveau microscopes de fluorescence à balayage qui adaptent leur schéma de balayage à l'échantillon observé. Des stratégies d'acquisition itérative et propagative



Méthodologie Smart-scan. les tissus biologiques s'organisent souvent en surfaces courbes (à gauche). Le microscope détecte automatiquement les surfaces 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)

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 (épithélia), cette approche de scan informé (smart-scan) permet de réduire l'irradiation de l'échantillon d'un facteur 20-100 sans perte de résolution (Abouakil et al. preprint).

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 [Ber17,Ref18, SCO18,Sco19,Stu19]. Cette technologie est actuellement en cours de dépôt de brevet et a été identifiée par les entreprises leaders du domaine comme une rupture technologique importante pour l'imagerie Raman, couvrant des applications très larges comme les microplatiques, le cancer et la pharmacologie.

4.2 Instrumentation

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

4.2.1 Imagerie de phase

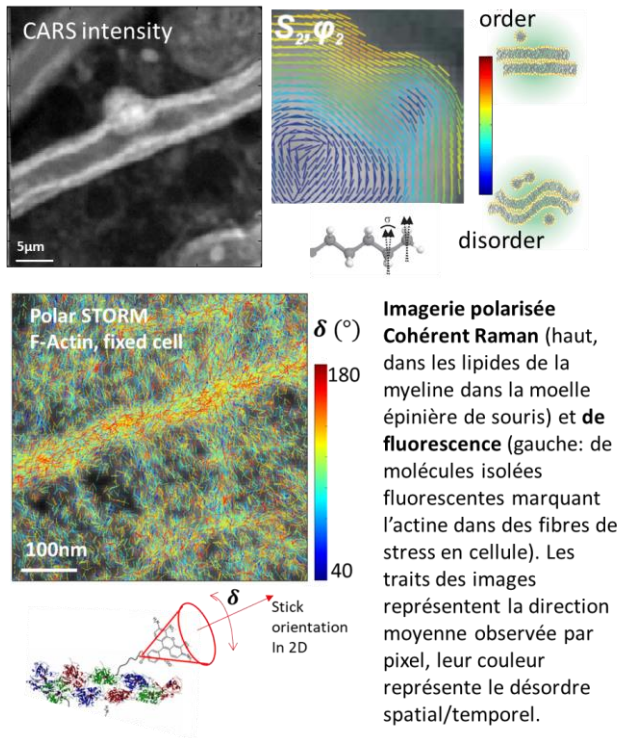
La technique de microscopie quantitative de phase par interférométrie à décalage quadri-latéral développée avec la société Phasics a permis des avancées significatives dans un large champ d'applications entre 2017 et 2019. En biologie, elle a permis l'imagerie cellulaire à haute résolution [ALL19], la 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) [DEK19]. En endommagement laser, elle a permis de nouvelles mesures métrologiques (DOU17a,RAD19). En science des matériaux, nous avons développé des méthodes de caractérisation optique de matériaux 2D [KAD17] et nanoparticules [KAD18] (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 [AKN17] ou induite par contraintes [DOU17b].

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, un travail sur la microscopie à réflexion totale a montré qu'il était possible d'imager des objets de phase posés sur l'interface eau-verre, en éclairant successivement l'échantillon sous différents angles, avec une résolution bien meilleure que les microscopes standards [Mai18]. Ce travail a fait l'objet d'un brevet [Mai19].

4.2.2 Imagerie de fluorescence et non linéaire polarisée

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



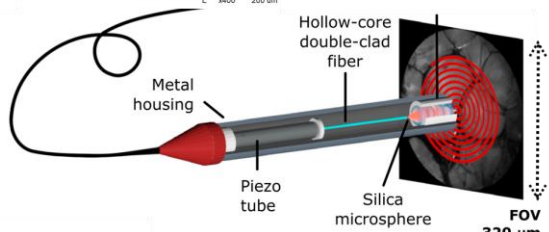
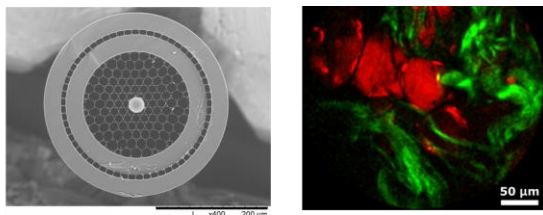
l'organisation moléculaire, ont permis de faire de l'imagerie polarimétrique 'live' un outil robuste utilisable en fluorescence [Jua19,Cho19,Loi18,Wan17], mais également pour des processus non-linéaires tels que la fluorescence 2-photons [Rou19,Ren19,Man19,Bal18,Bal17], et le Raman cohérent [Gas17,Hof17,Cle17]. Nos instruments font l'objet d'une dizaine de collaborations régulières (à Marseille : CIML, IBDM, INT ; Paris : I Curie, IJM, UPMC ; Allemagne : U. Brauschweig). Nous avons plus récemment proposé des approches originales pour l'imagerie de fluorescence super-résolution polarisée, capable de mesurer l'organisation moléculaire aux échelles nanométriques [Sha17, Cur19]. Ces approches ont un fort potentiel d'innovation (dépôt d'un brevet – [Bra20], collaboration Horiba).

4.2.3 Imagerie non linéaire

Nous développons depuis 20 ans l'imagerie sans marquage, Raman cohérente (CARS : coherent anti-Stokes Raman scattering ; SRS : Stimulated Raman scattering). Outre des contributions générales [Rig18a, Aud20] nous avons récemment amélioré la vitesse d'imagerie [Heu18a], permis l'acquisition d'image à deux fréquences vibrationnelles [HEU18b] et démontré une nouvelle imagerie SRS rapide aux très basses fréquences vibrationnelles [Raa19].

Des innovations ont été faites 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 [Agu17], angulaire [Hof19] et spectral [Ves19,Gui20]. Ceci nous a permis de montrer récemment, dans un régime multi-spectral, la génération de signaux CARS à une profondeur de quelques centaines de microns dans des tissus diffusants [Hof20].

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



Structure de la fibre optique micro-structurée et technologie de balayage pour l'endoscopie nonlinéaire dans un tissu tumoral : fluorescence 2 photon (rouge) et génération de second harmonique (vert).

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 300μm, l'endoscope réalise la recombinaison cohérente de 200 faisceaux pour les focaliser et balayer dans l'échantillon [Siv18a]. Nous avons par ailleurs démontré l'utilisation d'une fibre multi-cœurs apériodique permettant d'élargir de champ de vue à quelques 150μm [Siv18b] et le développement une fibre torsadée qui permet de rendre l'endoscope insensible à la courbure de la fibre [Tsv19] (dépôt d'un brevet – [Rig18b]).

Une société, Lightcore Technologies (<https://lightcore.tech/>) a été créé en juillet 2019 pour valoriser les technologies Raman cohérentes et endoscopes non linéaires développés à l'Institut Fresnel.

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].

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 leur 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 [LeH18a, LeH18b]. Ce projet est mené en collaboratoir 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

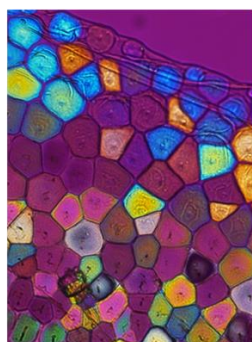
physique reste au cœur de ces nouveaux projets. Cet axe implique désormais actuellement 4 doctorants, 3 postdoctorants et un assistant ingénieur CDD en biochimie sur des financements obtenus à l'ANR (3 en cours) mais également Cancerpole PACA/FRM/ARC.

4.3.1 Morphogénèse des cellules et tissus

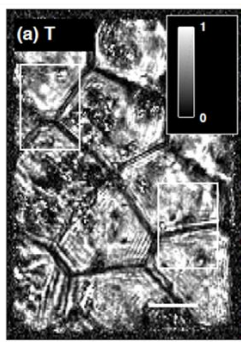
Nous avons développé des outils moléculaires (protéines de fusion à la GFP associées à l'actine) qui permettent pour la première fois la mesure de l'organisation des filaments d'actine dans des cellules et tissus vivants par imagerie polarimétrique de fluorescence [Jua19]. Ces rapporteurs d'organisation d'actine en temps réel ont un fort potentiel d'utilisation dans les domaines de la biologie cellulaire et biologie du développement. 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 *imagerie* (microscopie de fluorescence polarisée) et l'activité du thème *Information et photonique* (développement de microscopes adaptatifs).

4.3.2 Biominéralisation

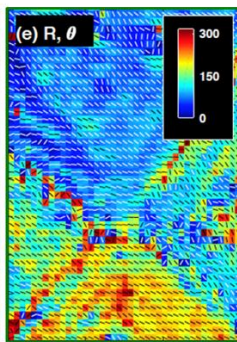
La biominéralisation intègre des phénomènes physico-chimiques complexes, bio-contrôlés par les organismes vivants. Nous combinons des microscopies nouvelles développées à l'Institut avec des approches à l'état de l'art, pour progresser dans la compréhension des processus de biominéralisation [Mas17]. 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).



Bord de croissance d'une coquille d'huître perlière (*Pinctada margaritifera*), observée en **microscopie de biréfringence**



Caractérisation d'une coquille d'huître (*Pinna nobilis*) par **ptychographie optique vectorielle**: cartes de transmittance (en niveaux de gris) et retardance (échelle de couleur en nm, l'orientation de l'axe rapide est indiquée par des tirets).



Carte de contrastes de deux polymorphes du carbonate de calcium (calcite en bleu, carbonate de calcium amorphe en rouge) obtenue par microscopie de **Raman cohérent** sur un bord de 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 [SAR19a]. 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 [Haj18].

4.4. Médical

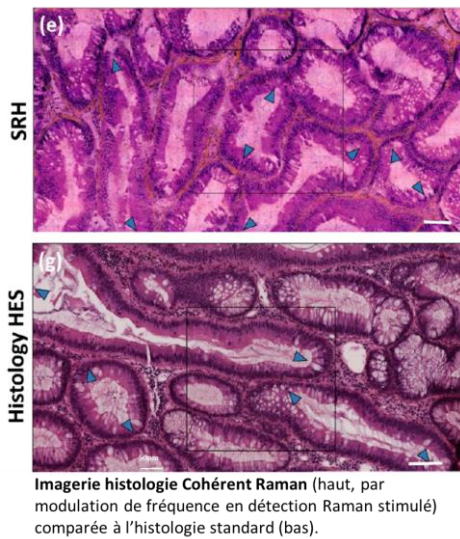
La recherche médicale à l'Institut se fait à travers des développements instrumentaux appliqués à la médecine ainsi que par la pratique hospitalière. D'une part l'Institut Fresnel a établi un lien collaboratif étroit avec la clinique et le médical (Institut Paoli Calmette, Hopital de La Timone, plateforme du CERIMED) pour l'application de certains de ses instruments; d'autre part une équipe de 9 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 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. L'imagerie est associée à une thérapie ciblée telle qu'un traitement anti-amyloïde [Cec18] une neuromodulation cérébrale (collaboration Multiwave pour la TMS, brevet FR3080293, [Ric18]) ou une thérapie radioactive en neuro-oncologie (radio-théranostiques - collaboration AAA/Novartis pour le traitement des méningiomes [Gra19]). 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}F -FDG de la consommation de glucose [Ver18a] : 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.

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 [SAR19b,SAR19c]. 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].

4.4.3 Photoacoustique et Thermothérapie

Nous avons par ailleurs participé au développement d'un dispositif expérimental multimodal pour le traitement du glioblastome par thermothérapie induite par chauffage de nanoparticules (localisé au CERIMED -Campus Timone, Marseille). L'instrument repose entre autre sur un transducteur ultrason permettant la mesure de température par photoacoustique (mode détection) et l'ouverture 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 l'hôpital universitaire de la Timone (APHM), le CHU de Toulouse, le CEA-LETI Grenoble, 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 [Mar19]. Ce travail fait l'objet d'un brevet [Geo18]. Ce travail est mené en collaboration avec le service d'ophtalmologie de l'Hopital Universitaire de La Timone (AH-HM).

4.5 Perspectives

Nous souhaitons dans les prochaines années promouvoir les outils de microscopie et endoscopie du laboratoire auprès des collaborateurs académiques, cliniques et industriels, dans le cadre d'une plateforme dans laquelle les développements technologiques « matures » seront mis à disposition des

collaborateurs extérieurs. Cette plateforme, en cours de demande de financement (CPER, Equipex) proposera des outils d'imagerie pour la biologie et le biomédical en fluorescence, nonlinéaire cohérent (en particulier multiphoton et Raman cohérent). Elle prolongera l'effort déjà bien établi de collaboration avec (et transfert technologique vers) l'industrie.

Les axes de recherche envisagés pour les prochaines années intégreront de manière plus importante les approches numériques développées au laboratoire pour les outils d'imagerie (en collaboration avec le thème *Information et Photonique*), suivant des directions qui sont aujourd'hui en cours de développement : optimisation des estimateurs pour augmenter la dynamique en imagerie scannée et/ou polarimétrique ; 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, ...).

D'autre part, pour 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 (ablation laser, mesures de force). 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.

De nouveaux projets d'imagerie Raman cohérente ont été initiés, notamment concernant l'imagerie du métabolisme du sucre, et du métabolisme biosynthétique des protéines dans des organismes modèles (bactéries, levures, *Drosophile*) par incorporation d'éléments deutérés. Par ailleurs, les nouvelles modalités d'imagerie Raman-comprimé et Raman cohérent CARS par ptychographie dans espace de Fourier seront explorées.

Thomas Chaigne a rejoint l'Institut début 2019 comme chargé de recherche CNRS. Il développe actuellement un système photoacoustique 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.

En biologie, nous avons initié un projet visant à élucider l'organisation et la fonction des septines animales, notamment dans l'embryon de *Drosophile*. Nous explorons le rôle joué par cette protéine dans le contrôle de la mécanique cellulaire et tissulaire. Par ailleurs, plusieurs projets de mécanobiologie ont récemment débutés. Tous reposent sur des outils optiques développés à l'Institut (optogénétique, ablation laser, imageries « intelligente » 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 (CdG, HiPHore) obtenu par Guillaume Baffou.

En imagerie médicale, nous associons les mesures TEP à des mesures électrophysiologiques intracérébrales (SEEG) sur le modèle de l'épilepsie focale pharmaco-résistante. Nous analysons 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.

L'arrivée des sources synchrotrons de 4eme 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 réels de systèmes cristallins dynamiques (processus de cristallisation synthétique ou biologique in vivo.)

Annexe

Information sur le rôle des représentant(e)s de thèmes, Institut Fresnel

Chers et chères collègues

Nous repensons actuellement la définition des thèmes et le rôle de leurs représentant(e)s. Ces thèmes sont un élément important de l’affichage du laboratoire, mais également une structure qui doit nous aider à définir de manière plus pertinente son évolution, en permettant une expression générale des besoins et évolutions scientifiques.

Nous souhaitons que pour chaque thème, un(e) membre permanent(e) représente ce thème dans son ensemble et participe, grâce aux échanges menés au sein des thèmes, à la politique scientifique du laboratoire. Chaque représentant(e) sera épaulé(e) par un(e) adjoint(e) désigné(e) par elle/lui. Ces quatre représentant(e)s seront élu(e)s par les chercheurs/enseignant-chercheurs/ingénieurs du laboratoire se déclarant membre du thème correspondant.

Les thèmes n’ont pas vocation à se substituer aux équipes, dont les prérogatives restent inchangées, mais à faciliter et enrichir les échanges dans le cadre de socles scientifiques communs.

Le rôle

Les grandes lignes du rôle de ces représentants seront donc les suivantes :

- Diffuser les informations depuis la direction vers les membres des thèmes.
- Animer les échanges lors des réunions de thèmes et faire remonter les besoins exprimés, sans filtrage, dans les réunions de bureaux élargis réguliers. Ces besoins peuvent notamment concerner les demandes annuelles ou ponctuelles de postes (EC, CNRS, IT). L’arbitrage final s’effectue toujours au niveau de la direction, après avis du conseil de laboratoire, comme indiqué dans le règlement intérieur.
- Préparer les rapports des évaluations externes (comité externe, HCERES).
- Représenter le thème lorsque cela est nécessaire, lors de présentations, de réunions et de visites.
- Répondre aux diverses demandes de rapports de bilans et de perspectives (CNRS, AMU...).
- Participer à la constitution du comité d’arbitrage de l’appel à fonds de besoins (que nous proposons en remplacement des fonds pour la science). Ce comité ad hoc de 8 personnes sera formé des représentant(e)s de thème (ou de membres nommés par elles/eux), d’un membre de la direction, et de membres nommés par la direction.

- Participer aux actions de communication nécessaires comme la mise à jour du site web du laboratoire.

Le vote

Les personnels votant sont les permanent(e)s membres d'équipes de recherche, ainsi que les membres des services communs co-auteurs de publications scientifiques.

La participation à un thème est conditionnée par le fait de déposer des publications, en tant que co-auteur, dans ce thème.

Pour chaque thème, le vote doit porter sur un nom.

Lorsque l'électeur se déclare appartenant à plusieurs thèmes, le vote est compté au prorata de la participation au thème (arrondi à 25, 50, 75 ou 100%).

Les réunions

Les membres de la direction (directrice, directeurs adjoints) et les quatre représentants de thèmes forment le bureau de l'Institut. Ils se réunissent au moins quatre fois par an.

Les représentant(e)s de thème réunissent les membres d'un thème au moins avant chaque réunion du bureau élargi de l'Institut Fresnel, notamment lorsqu'une réflexion est nécessaire pour des remontées d'informations, quelle que soit leur nature.

Les membres de la direction continuent de rencontrer les responsables d'équipe lors de réunions régulières (a minima une fois par trimestre), pour informer et échanger à l'issue des décisions prises lors des réunions du bureau élargi. Ces rencontres concernent les discussions portant sur l'organisation générale du laboratoire, ainsi que sur les questions opérationnelles des équipes et de leur activité de recherche : locaux, arbitrage des candidatures aux bourses de thèse (ED, DGA), ...

L'information échangée lors des réunions des thèmes et des bureaux élargis est donc une voie complémentaire de celle échangée lors des réunions de responsables d'équipes, et permettent une transparence sur les informations échangées entre direction, représentant(e)s de thèmes et responsables d'équipes.

L'animation

L'organisation de l'animation sera assurée par un ou plusieurs collègues du thème. Cette animation correspond notamment à l'organisation d'un séminaire par mois.

La direction de l'Institut Fresnel,

Sophie Brasselet, Jean-Yves Natoli, Julien Lumeau

Le 4 décembre 2019