

Vague C :
Campagne d'évaluation 2016 - 2017

INSTITUT FRESNEL

Dossier d'évaluation

Nom de l'unité : **INSTITUT FRESNEL**

Acronyme : **INSTITUT FRESNEL**

Nom du directeur pour le contrat en cours : **Stefan ENOCH**

Nom du directeur pour le contrat à venir : **Stefan ENOCH**

Type de demande :

Renouvellement à l'identique ☒

Restructuration ☐

Création ex nihilo ☐

Établissements et organismes de rattachement :

Liste des établissements et organismes de rattachement de l'unité de recherche pour le prochain contrat (tutelles) :

- Aix-Marseille Université
- CNRS
- Centrale Marseille

Choix de l'évaluation interdisciplinaire de l'unité de recherche :

Oui ☐

Non ☒

SOMMAIRE

PRESENTATION DE L'UNITÉ.....	7
<i>Politique scientifique.....</i>	<i>8</i>
<i>Profil d'activités.....</i>	<i>11</i>
<i>Organisation et vie de l'unité.....</i>	<i>11</i>
<i>Faits marquants.....</i>	<i>20</i>
STRATEGIE ET PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES DU LABORATOIRE POUR LE FUTUR CONTRAT	22
THEME 1 - ELECTROMAGNETISME ET METAMATERIAUX	25
REALISATIONS	27
<i>Production scientifique</i>	<i>28</i>
<i>Rayonnement et attractivité académiques</i>	<i>37</i>
<i>Interaction avec l'environnement social, économique et culturel</i>	<i>39</i>
IMPLICATION DU THEME DANS LA FORMATION PAR LA RECHERCHE	40
STRATEGIE ET PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES POUR LE FUTUR CONTRAT	41
THEME 2 – NANOPHOTONIQUE ET COUCHES MINCES OPTIQUES	45
REALISATIONS	47
<i>Production scientifique</i>	<i>47</i>
<i>Rayonnement et attractivité académiques</i>	<i>55</i>
<i>Interaction avec l'environnement social, économique et culturel</i>	<i>56</i>
IMPLICATION DU THEME DANS LA FORMATION PAR LA RECHERCHE	57
STRATEGIE ET PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES POUR LE FUTUR CONTRAT	57
THEME 3 – TRAITEMENT DE L'INFORMATION ET ONDES ALEATOIRES	61
REALISATIONS	63
<i>Production scientifique</i>	<i>63</i>
<i>Rayonnement et attractivité académiques</i>	<i>67</i>
<i>Interaction avec l'environnement social, économique et culturel</i>	<i>68</i>
IMPLICATION DU THEME DANS LA FORMATION PAR LA RECHERCHE	70
STRATEGIE ET PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES POUR LE FUTUR CONTRAT	70
THEME 4 – IMAGERIE AVANCEE ET VIVANT	73
REALISATIONS	75
<i>Production scientifique</i>	<i>75</i>
<i>Rayonnement et attractivité académiques</i>	<i>82</i>
<i>Interaction avec l'environnement social, économique et culturel</i>	<i>83</i>
IMPLICATION DU THEME DANS LA FORMATION PAR LA RECHERCHE	84
STRATEGIE ET PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES POUR LE FUTUR CONTRAT	85

PRÉSENTATION DE L'UNITÉ

En introduction, il semble important de revenir sur les événements majeurs qui ont jalonné les années qui nous séparent de la naissance de l'Institut Fresnel. L'objectif est de présenter l'unité dans son contexte ainsi qu'une vision dynamique pour laquelle l'impulsion initiale et la trajectoire suivie jusque-là ont toute leur importance.

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

Lors de sa création, l'Institut Fresnel, comptait 74 membres (50 permanents et 24 doctorants). Aujourd'hui, ce sont 164 personnes (83 permanents, 81 non-permanents dont 54 doctorants) qui y travaillent quotidiennement. Il faut y ajouter environ une cinquantaine de stagiaires chaque année. Plus d'une vingtaine de nationalités sont représentées. Dans le même temps, le budget est passé d'une moyenne d'environ 1,1 M€ sur le premier quadriennal (dont environ 100 k€ de dotation annuelle des établissements de tutelle) à plus de 2.9 M€ pour la dernière période (dont environ 340 k€ de dotation annuelle). Les dépenses en personnels, payés sur contrats pour la même année sont d'environ 1,2 M€.

Lors du premier quadriennal, l'Institut Fresnel comptait six équipes en son sein. La structure a évolué durant cette dernière période vers une présentation par thèmes qui se superpose aux équipes (au nombre de 13 aujourd'hui). Les rôles respectifs de chacun seront développés par la suite.

Les mandatures précédentes ont vu par ailleurs un nombre important de modifications contextuelles. Je ne ferai que mentionner celles que tout le monde connaît : ANR, HCERES, et bien d'autres qui nous conduisent à gérer une complexité croissante.

Localement, les créations de Centrale Marseille puis d'Aix-Marseille Université (AMU) ont profondément fait évoluer nos établissements locaux de tutelle et nombre de permanents de l'Institut Fresnel ont été impliqués à divers degrés dans ces fusions.

L'obtention d'un bâtiment unique a modifié les relations entre les équipes initiales et de nombreuses collaborations inter-équipes ont pu ainsi être développées beaucoup plus facilement (dossier initié en 2005 et regroupement effectif en 2008). Ainsi, aujourd'hui, l'Institut Fresnel se situe sur le campus de Saint Jérôme dans le treizième arrondissement de Marseille. Toutefois, la chambre anéchoïque du Centre Commun de Recherche en Micro-ondes, principalement opérée par des personnels de l'Institut Fresnel, reste située dans les locaux de Polytech Marseille à Château-Gombert (à environ 4 km - 10 minutes en voiture). De plus, quelques personnels ont la jouissance de locaux au sein du Centre Européen de Recherche en Imagerie Médicale (CERIMED, actuellement constitué en GIS) situé sur le campus de la Timone (Faculté de Médecine, 9 km environ soit 15 minutes en voiture ou 30 minutes en bus et métro). Les activités qui y sont menées, concernent l'analyse de cornées (collaboration Pr. L. Hoffart, INT).

Plus récemment, la fin du projet CPER "Espace Photonique" initié en 2005, nous a permis de franchir une nouvelle étape dans le développement de l'Institut Fresnel (inauguration en Juin 2015). Nous en ressentons déjà les effets, mais nous en mesurerons tout l'impact dans les années à venir.

Enfin, dans le domaine de l'enseignement, il me paraît important de noter l'obtention tout d'abord d'un Master Erasmus Mundus Europhotonics (ainsi que d'un programme *doctorate*) lors de la période précédente qui a, par la suite, été renforcé par un programme international financé par A*MIDEX (IDEX pilotée par AMU). Cela a permis d'obtenir ensuite le label ERASMUS+. Ces projets ont été portés par le laboratoire. Le master Europhotonics-POESII regroupe ainsi plus d'une trentaine d'étudiants en M1 venus étudier la photonique à Marseille (dont 15 ont une bourse).

Ce bref bilan montre que peu de choses subsistent de l'environnement initial de l'Institut Fresnel. Durant cette période, la structure de l'Institut Fresnel a procuré une forme de stabilité qui était sans aucun doute nécessaire. Néanmoins, l'augmentation du nombre d'équipes et de personnes rendrait difficile une politique scientifique de l'Institut Fresnel qui aille au-delà d'une somme (incohérente) de celles des équipes. Ce risque avait d'ailleurs été évoqué par le dernier comité d'évaluation de l'Institut Fresnel. De plus, les recouvrements en partie dus au plus grand nombre de collaborations inter-équipes d'une part, et les évolutions des thématiques au sein des équipes d'autre part, rendraient aujourd'hui une présentation scientifique par équipe de l'Institut Fresnel très laborieuse et peu compréhensible.

POLITIQUE SCIENTIFIQUE

Afin de construire cette politique scientifique partagée, nous avons souhaité mettre en place un processus collectif visant à obtenir l'adhésion la plus large possible à la vision qui s'en dégage.

Les étapes de ce processus ont été les suivantes :

- Définition d'ateliers scientifiques au cours desquels les chercheurs ont présenté leurs activités. Les thèmes des quatre ateliers ont été décidés avec la participation active des responsables d'équipe. Les ateliers ont eu lieu à raison d'un par mois.
- Suite à ces ateliers, des tables rondes ouvertes à l'ensemble des permanents ont été organisées de manière à en tirer un bilan et esquisser les contours de thèmes scientifiques indépendamment des équipes. Quatre thèmes qui diffèrent en partie des thèmes des ateliers ont été proposés, ainsi qu'un ensemble d'activités au sein de ces thèmes.

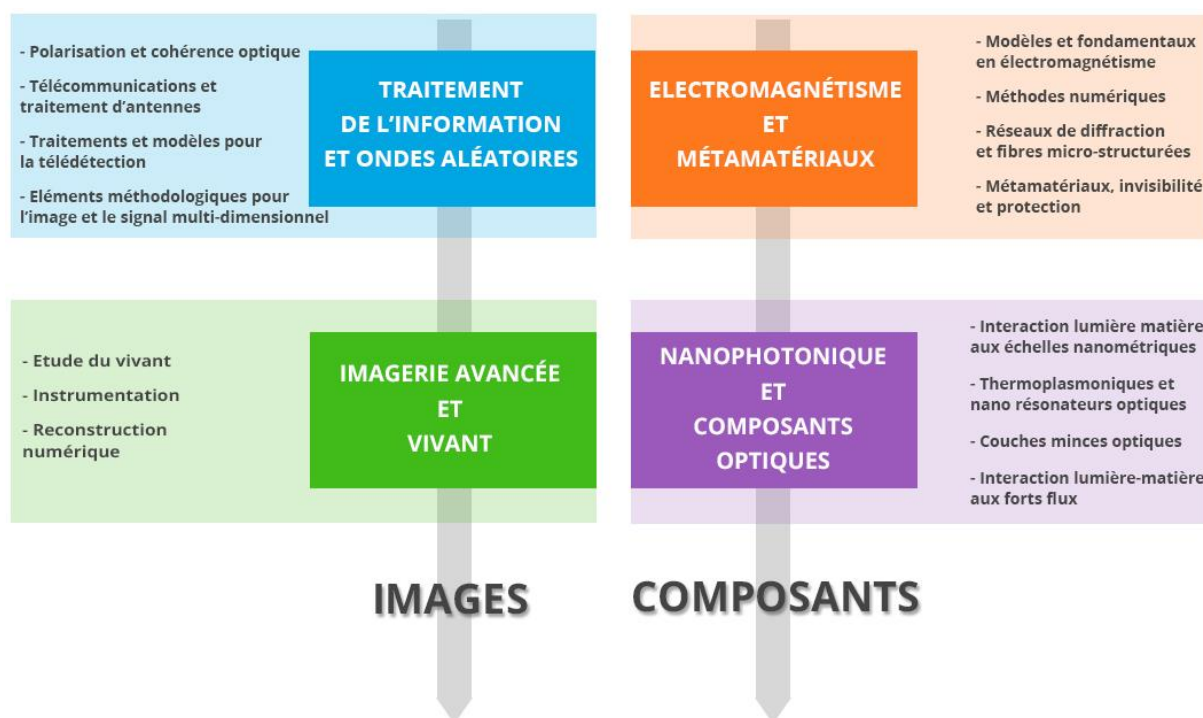
Cette structuration en quatre thèmes est présentée dans le schéma ci-dessous qui mentionne aussi un certain nombre de mots clés. Bien entendu, les liens entre ces différents thèmes sont nombreux et seront précisés dans la suite de ce rapport.

- Ensuite, des personnes se sont chargées de coordonner la rédaction du présent document en faisant appel à la participation la plus large possible.

- Enfin, nous avons souhaité la création d'un comité scientifique externe pour avoir une vision extérieure sur les axes proposés. Cela nous a permis, sans aucun doute, d'améliorer encore la cohérence et la présentation de ces thèmes.

L'ensemble de ce travail aura duré environ un an et demi.

Cette structuration vise deux objectifs majeurs : une présentation scientifique cohérente ainsi que la définition d'une base solide pour définir une politique scientifique partagée. Les questions relatives à l'organisation opérationnelle (gestion des moyens et personnes) restent de la responsabilité des équipes.



Les thèmes font ressortir deux lignes de force de la recherche menée au sein de l'Institut Fresnel, autour des notions, prises au sens large, d'image (formation, traitement, applications,...) et de composants (modélisation, réalisation, caractérisation,...). Le projet scientifique de l'Institut Fresnel se dégage aisément autour de ces deux lignes.

La pluridisciplinarité trouve naturellement une place importante et fait partie intégrante de la stratégie de l'Institut Fresnel dans le domaine de l'imagerie. Depuis la création de l'équipe MOSAIC en 2000, l'Institut Fresnel a su en effet développer une recherche du meilleur niveau dans ce domaine.

Ainsi, nous avons acquis une solide réputation internationale (comme le montre, par exemple, la médaille d'argent du CNRS obtenue cette année). Les physiciens et les spécialistes du traitement des images sont, depuis sa création, partie prenante de l'Institut Fresnel et interagissent quotidiennement. De plus, les collaborations avec des biologistes et des médecins sont nombreuses (par exemple à Marseille : CIML, IBDM, CRCM, INT, CRMBM, INMED...) à la fois sur les aspects instrumentaux et de traitement des images. Ajoutons que, outre un IR CNRS en BAP A recruté durant la mandature qui s'achève, deux chercheurs biologistes ont rejoint l'Institut Fresnel récemment.

Par ailleurs, l'Institut Fresnel participe aux infrastructures nationales France Bio-Imaging et France Life Imaging sur les volets développements instrumentaux en particulier (microscopies). Il convient de noter aussi la participation à CERIMED (Centre Européen de Recherche en Imagerie Médicale) depuis sa création. Il est proposé que son statut actuel de GIS évolue vers une UMS pour la prochaine période. Comme mentionné précédemment, des personnels sont actuellement en partie localisés dans les locaux de CERIMED (Campus Timone) dans le cadre de projets sur l'ophtalmologie en collaboration avec l'Institut des Neurosciences de la Timone (INT).

Le développement d'une ligne de force sur les composants de l'Institut Fresnel doit permettre de couvrir un continuum d'activités allant de thèmes fondamentaux jusqu'aux applications industrielles, renforçant ainsi les liens qui existent entre les différents acteurs et en créant de nouveaux.

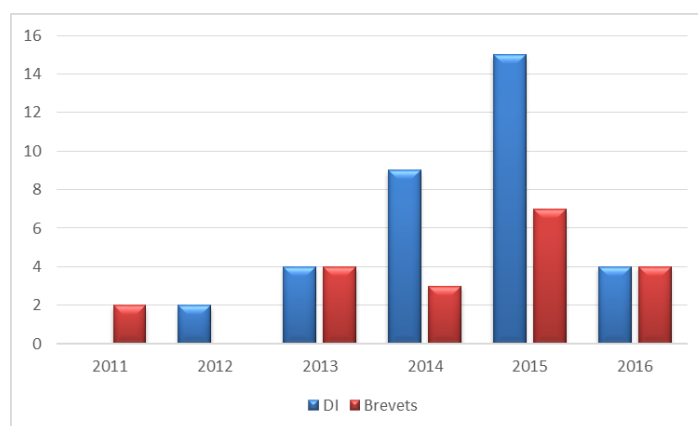
L'Institut Fresnel possède des expertises historiques internationalement reconnues dans les domaines de la modélisation électromagnétique et des couches minces optiques (héritées des laboratoires fondateurs). Il a développé une recherche au meilleur niveau international également sur les métamatériaux et la nanophotonique (attesté par des prix scientifiques et financements ERC).

L'aboutissement du projet "Espace Photonique" financé dans le cadre du CPER a permis à l'Institut Fresnel de se doter d'équipements de pointe et d'un environnement adapté (salle blanche) aux recherches technologiques dans le domaine des couches minces. Cet investissement permet de nous situer au meilleur niveau international. Dans ce domaine, nous envisageons de mettre en place une plateforme étendue qui permettra de rendre plus accessible les moyens technologiques dédiés aux couches minces optiques à la fois pour des industriels et des académiques (la demande est forte). La spécificité de cette plateforme nous conduit à une discussion avec RENATECH afin qu'elle puisse être considérée comme une plateforme nationale. Marseille possède dans ce domaine ainsi que dans celui des procédés lasers une spécificité et un niveau d'excellence qui ont été clairement identifiés.

D'autres équipements scientifiques sont engagés dans une logique de plateforme : bio-photonique, micro-ondes, photonique de puissance et diffusion lumineuse. Ces équipements sont basés sur des points d'excellence dans le domaine de l'instrumentation et de la métrologie. Il faudra évaluer le degré d'ouverture qui sera possible et souhaitable au cas par cas, l'objectif étant à la fois d'assurer la pérennité au meilleur niveau de ces équipements et d'en permettre l'accès à une large communauté académique et industrielle.

Ces plateformes constituent une ouverture vers les partenaires extérieurs, en particulier, les industriels. Outre notre participation à l'Institut Carnot Star, nous souhaitons développer des partenariats étroits tels que des laboratoires communs. La création du laboratoire commun LABTOP avec Cilas ainsi que notre participation dans l'Open Lab PSA Peugeot Citroën en sont de parfaites illustrations. Nous pouvons enfin noter l'obtention par un chercheur du laboratoire du prix FIEEC, qui récompense une recherche partenariale ayant conduit à la création significative d'emplois dans une PME ou une ETI.

La démarche de transfert technologique de l'Institut Fresnel a été soutenue par la Société d'Accélération de Transfert de Technologies Sud-Est (SATT-SE). Ainsi sur la période 2011- juin 2016, nous avons déposé 34 déclarations d'invention auprès des établissements de tutelle qui ont, elles-mêmes, donné lieu à 16 brevets. Actuellement 3 brevets font l'objet d'une licence d'exploitation. Le graphique ci-dessous présente le nombre de déclarations d'invention ainsi que le nombre de brevets déposés par les personnels de l'Institut Fresnel par année. Nous pouvons clairement constater que ces deux indicateurs ont très largement augmenté. Nous pouvons espérer que cela se traduise prochainement par une augmentation du nombre de brevets licenciés et la création d'entreprises innovantes. Les cinq projets de maturation engagés par la SATT-SE vont dans ce sens (pour une somme de 986 500 €). L'effet du travail mené par la SATT SE avec l'Institut Fresnel est donc tout à fait notable.



Nombre de déclaration d'invention et de brevets déposés par année

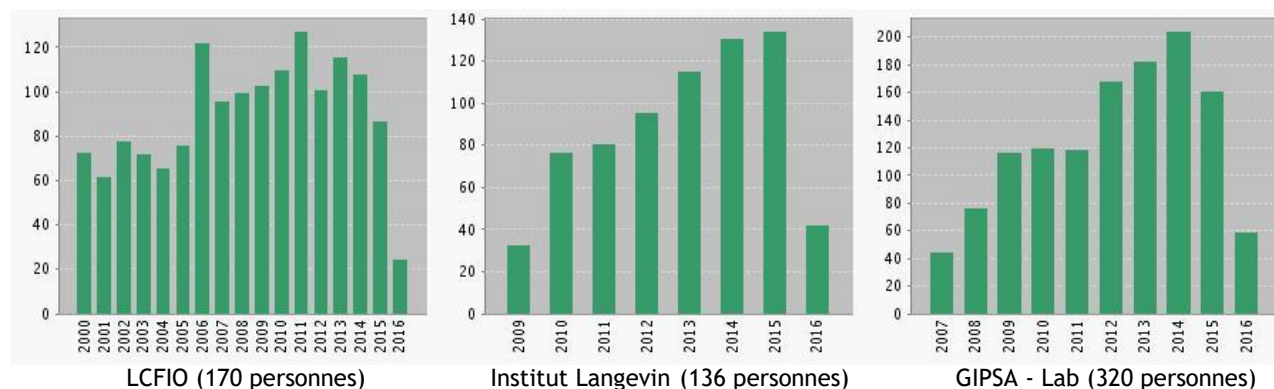
Enfin, des partenariats scientifiques étroits avec certains centres internationaux ont été liés à travers deux laboratoires internationaux associés (LIA) dont nous assurons la direction. Le premier, ALPhFA est un partenariat entre l'Institut Fresnel, le C2N, et l'INL pour la France et le CUDOS pour l'Australie (un *ARC Center of Excellence* qui associe sept universités australiennes). Il porte sur la plasmonique et les antennes optiques, sur les métamatériaux et, sur le moyen infrarouge. Le second est un partenariat avec le Weizmann Institute en Israël et porte sur les innovations en microscopie et imagerie biologique, les processus biologiques photo-induits, les biocapteurs et biopuces et la nano-physique. De plus, les partenaires du Master Europhotronics POESII sont aussi, bien entendu, des partenaires privilégiés dans nos collaborations scientifiques (par exemple ICFO à Barcelone).

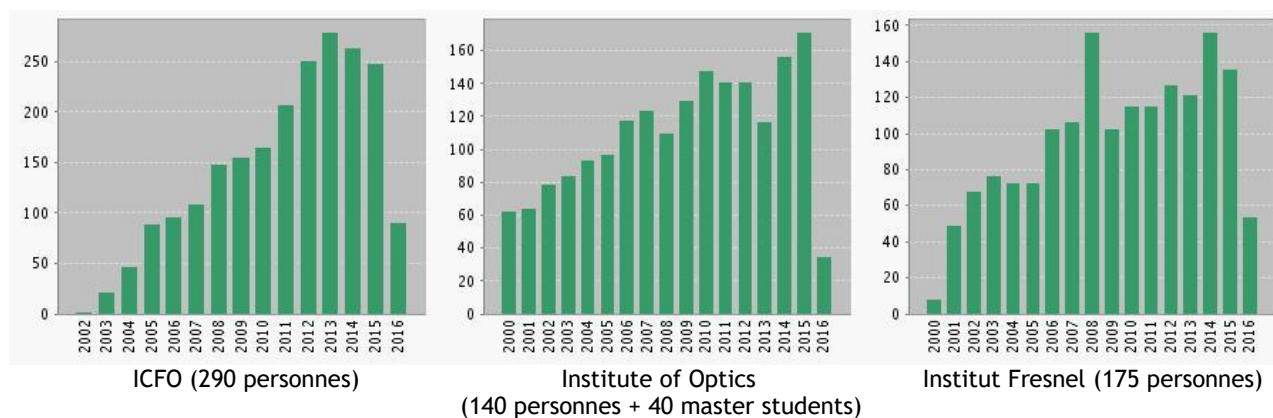
Outre les points forts soulignés précédemment et qui seront développés dans les parties consacrées à chaque thème, nous proposons dans les pages suivantes de donner des éléments de comparaison avec des structures de recherche nationales et internationales similaires. Nous avons choisi trois laboratoires nationaux : le Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique, l'Institut Langevin et GIPSA Lab; un laboratoire Européen : ICFO (Barcelone, Espagne) et une structure américaine : The Institute of Optics (Rochester, USA).

Bien entendu, ces comparaisons sont délicates car les chiffres ne prennent en compte ni les spécificités scientifiques de chacun ni l'organisation de la recherche ou des financements des pays. Par exemple, comparer la production scientifique d'un spécialiste du traitement du signal à celle d'un biologiste est, pour le moins, délicat. Dans cet esprit, nous avons inclus GIPSA Lab orienté vers l'automatique, le traitement de la parole, du signal et des images dans nos exemples afin d'avoir une base de comparaison pour les 13 enseignants-chercheurs de la section 61 et le chercheur de la section 7 soit 18% des E-C et chercheurs du laboratoire.

Les productions scientifiques de ces structures sont présentées dans la figure ci-dessous. Nous pouvons constater que nos productions sont tout à fait similaires à ces structures de référence (rapportées aux tailles des unités). Une exception : celle de GIPSA-Lab qui est légèrement en retrait (compte tenu d'une taille plus importante), en raison d'un mode de fonctionnement différent de cette communauté. Bien entendu, le nombre de publications ne permet pas d'avoir une vision complète du dynamisme et de la qualité de la recherche effectuée au sein d'un laboratoire. Néanmoins, c'est une donnée qui est aisément accessible et permet au moins de situer la production scientifique en termes de publications. Nous pouvons aussi noter que l'Institut Fresnel est une unité de taille moyenne selon les standards nationaux et internationaux dans notre domaine.

Outre ces données purement quantitatives, le positionnement scientifique de l'Institut Fresnel explicité plus haut est différenciant. Plus précisément, les spécificités et points d'excellence du laboratoire sont au meilleur niveau international comme le montrent les résultats scientifiques qui seront détaillés par la suite.





Productions scientifiques de l'Institut Fresnel et de 5 structures similaires

Le tableau ci-dessous indique le nombre d'articles dans les revues à haut facteur d'impact. Comme le nombre de publications, cet indicateur ne donne qu'une vision très partielle de l'activité de l'Institut Fresnel. Néanmoins, nous notons une augmentation par rapport à la période précédente. Inciter les chercheurs à publier leurs travaux dans les revues dont l'impact est le plus élevé possible est un objectif important.

Source Titles	records	IF 2015
NATURE NANOTECHNOLOGY	1	34,048
SCIENCE	1	33,611
NATURE PHOTONICS	1	32,386
NATURE METHODS	1	32,072
NATURE CELL BIOLOGY	1	19,679
NANO LETTERS	6	13,592
ACS NANO	9	12,881
NATURE COMMUNICATIONS	5	11,47
PNAS	1	9,423
PHYSICAL REVIEW LETTERS	11	7,512

Nombre de publications dans les revues à haut facteur d'impact et facteur d'impact 2015 de la revue

PROFIL D'ACTIVITÉS

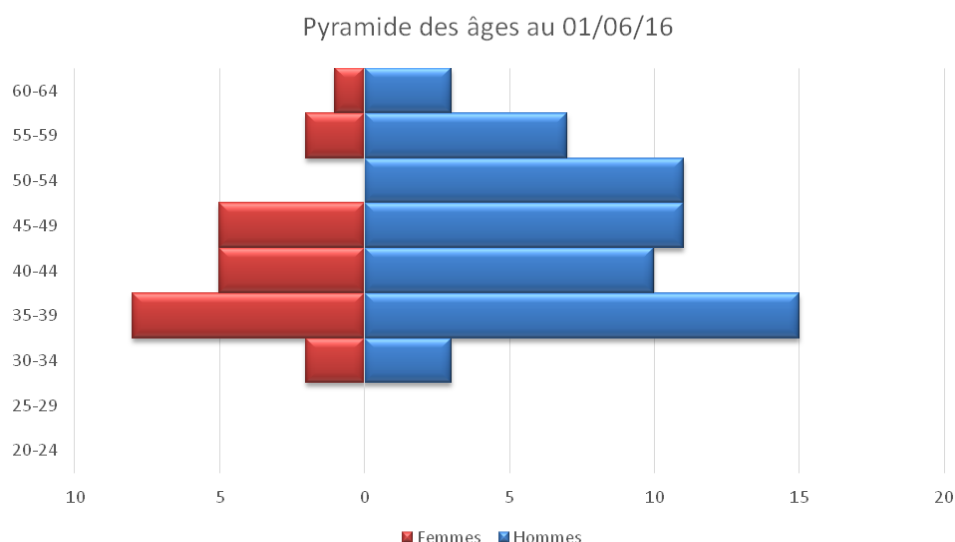
Le profil d'activité présente peu de différences entre les thèmes aussi n'avons-nous pas jugé utile de détailler au-delà du profil de l'ensemble de l'unité.

Unité/Équipe	Recherche académique	Interactions avec l'environnement	Appui à la recherche	Formation par la recherche	Total
Ensemble	60	10	10	20	100 %

ORGANISATION ET VIE DE L'UNITÉ

L'analyse des évolutions des ressources humaines fait ressortir quelques éléments. Tout d'abord, la majeure partie de l'augmentation concerne les personnels non permanents. Cette augmentation est liée à celle des crédits sur contrat ou programme qui sera détaillée par la suite.

La pyramide des âges des personnels permanents de l'Institut Fresnel montre une population importante dans la tranche d'âge 35-39 ans. La proportion femme/homme est d'environ 0,4 (tous corps et grades confondus).



Pyramide des âges des personnels permanents de l'Institut Fresnel.

Cette période a vu un nombre de recrutements d'enseignants-chercheurs et de chercheurs particulièrement faible : un seul enseignant chercheur (MCF AMU IUT section 63) et un seul chercheur (section 08). Heureusement, il faut ajouter à cela trois chercheurs CNRS qui nous ont rejoints par mutation (1 section 08 et 2 section 22). Deux enseignants-chercheurs ont aussi pu bénéficier de promotions de MCF à PU (PU AMU UFR Science en section 30 et 61) ainsi que deux chercheurs, en section 08, d'une promotion de CR à DR. Dans le même temps, nous avons eu le départ d'un enseignant-chercheur (MCF ECM section 61) et d'un professeur en éméritat (PU ECM section 63) qui n'ont pas, à ce jour, été renouvelés par la tutelle.

Le tableau ci-dessous indique la répartition des chercheurs et enseignants-chercheurs par section du CNRS et CNU.

	CNRS				Aix-Marseille Université Ecole Centrale Marseille			
	Section 5	Section 7	Section 8	Section 22	Section 28	Section 30	Section 61	Section 63
Chercheurs ou Enseignants-Chercheurs	1	1	14	2	1	17	11	20

Côté ITA, nous avons pu bénéficier, au CNRS, de deux recrutements d'ingénieurs de recherche sur concours externe (BAP A - biologiste - et BAPC - couches minces optiques - actuellement en cours donc non comptabilisé) ainsi que de deux NOEMI (Techniciens BAP C mécanicien et BAP J gestionnaire financière). Durant la même période, les départs ont concerné un IR BAP C (couches minces optiques) et un AI BAP C (mécanique).

Aix-Marseille Université nous a accordé un AJT BAP C (mécanique) suite à une réaffectation des personnels d'un atelier de mécanique de l'UFR et un CDD pour l'accueil suite à la mise en place de la Zone à Régime Restrictif (ZRR) qui concerne l'Institut Fresnel.

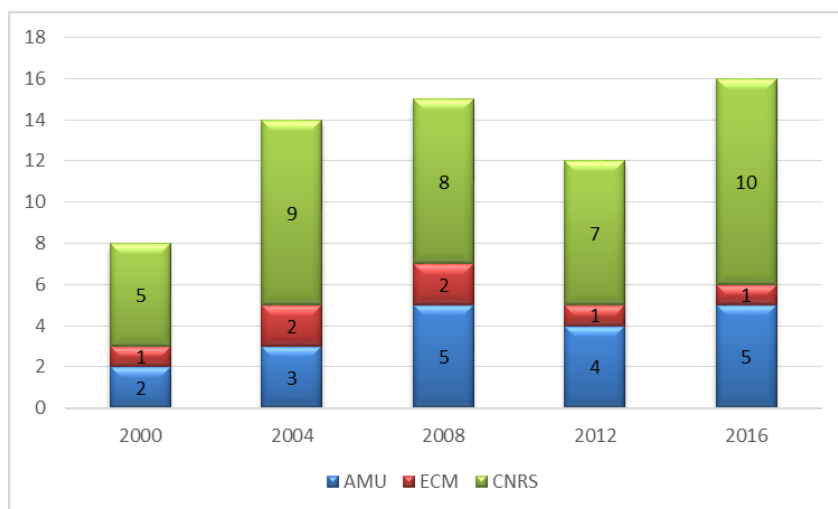
La répartition par branche d'activité professionnelle (BAP) est la suivante :

BAP J: 6
 BAP C: 6 (7)¹
 BAP E: 2
 BAP G: 1
 BAP A: 1

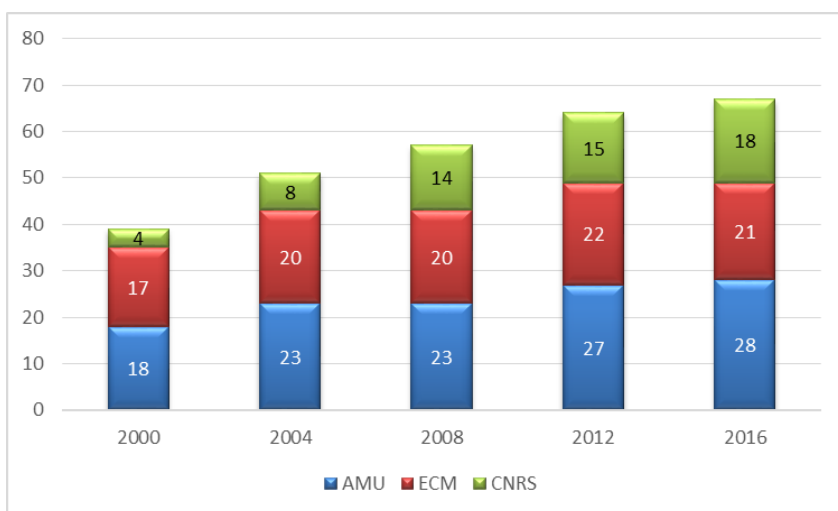
Globalement, le nombre de personnels ITA/IATSS est faible (ratio de 0,24 par enseignant-chercheur ou chercheur et tout particulièrement dans les fonctions de soutien à la recherche). Le graphique ci-dessous présente l'évolution du nombre d'ITA/IATSS depuis la création de l'Institut Fresnel. Cette évolution est à mettre en regard de l'augmentation du nombre total de personnels qui est passé de 50 permanents et 25 doctorants à la création de l'Institut Fresnel à 83 permanents et 85 non-permanents dont 54 doctorants. Le nombre de personnels sur les fonctions support et soutien

¹ évolution due au recrutement en cours d'un personnel

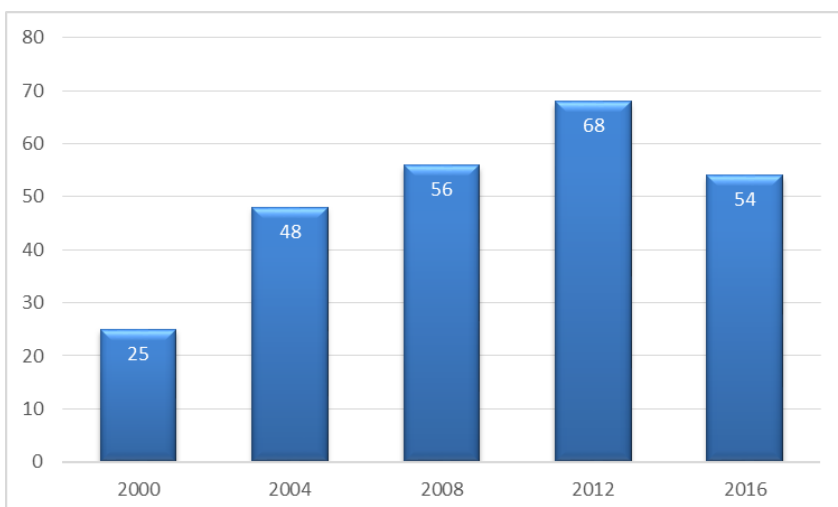
n'a pas complètement suivi cette augmentation qui est, de plus, accompagnée d'une augmentation de la complexité des tâches effectuées ce qui, bien entendu, a des conséquences importantes sur la charge de travail et tout particulièrement celle des services communs.



Evolution du nombre d'ITA/IATSS depuis la création de l'Institut Fresnel

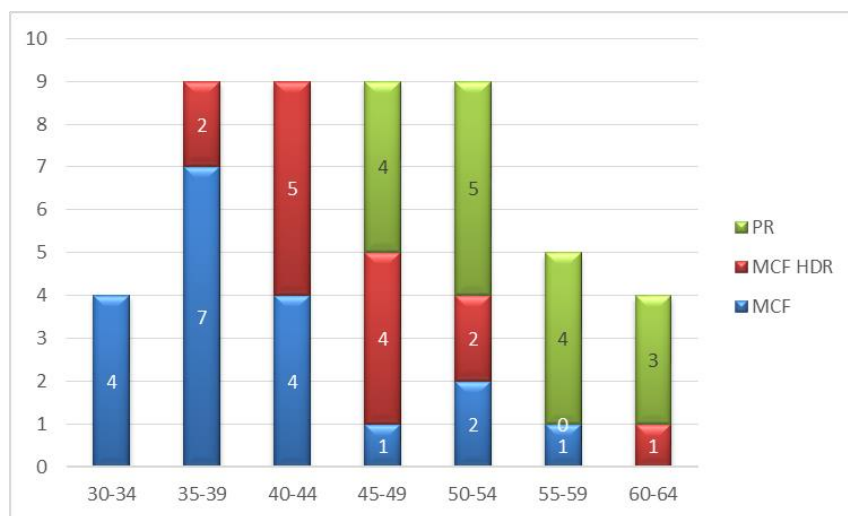


Evolution du nombre de chercheurs/EC depuis la création de l'Institut Fresnel

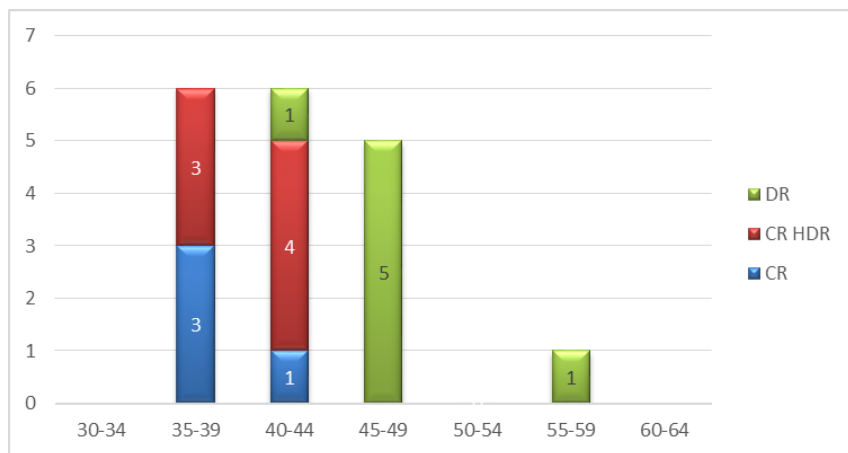


Evolution du nombre de doctorants depuis la création de l'Institut Fresnel

Une des difficultés majeures de la gestion des ressources humaines de l'Institut Fresnel est la gestion des promotions des personnels. La situation est particulièrement critique pour les maîtres de conférences habilités à diriger des recherches qui sont actuellement 14 à l'Institut Fresnel et dont le nombre devrait vraisemblablement continuer à augmenter. Le graphique ci-dessous montre la répartition par tranche d'âge des enseignants-chercheurs. S'il est évident que tous ne bénéficieront pas d'une promotion sur l'aire marseillaise, les établissements doivent pouvoir permettre de garder les meilleurs éléments et de ne pas offrir une vision d'avenir décourageante à leurs personnels. La mise en place d'un poste "blanchi pour la promotion" les trois dernières années sur l'ensemble des laboratoires de physique par l'UFR Science d'AMU est une initiative qui va dans ce sens (nous en avons d'ailleurs bénéficié pour la promotion en section 30 mentionnée précédemment). Concernant les chercheurs, nous ne constatons aucun retard de carrière particulier (par rapport aux moyennes d'âge de passage directeur de recherche nationales cf. graphique ci-dessous) mais les chargés de recherche susceptibles d'être promus avant la fin de la prochaine période sont relativement nombreux (tranches d'âges 35 à 44).



Répartition des enseignants-chercheurs par tranche d'âge



Répartition des chercheurs par tranche d'âge

La pyramide des âges de l'Institut Fresnel et les contraintes financières des établissements de tutelle se conjuguent pour donner lieu à une difficulté pour gérer ces points. Bien entendu, une politique saine doit aussi prévoir des recrutements de personnes extérieures, que ce soit sur des emplois de professeurs ou de maîtres de conférences.

Le second point difficile concerne les promotions ITA et IATSS pour lesquelles les moyens d'action et les possibilités sont limités. Les incitations à passer les concours et les différentes aides que nous pouvons offrir pour constituer des dossiers peuvent paraître faibles. Des difficultés particulières sont liées à certains types de poste (par exemple SAENES) pour lesquels les critères appliqués sont éloignés des réalités d'un laboratoire de recherche. Les personnels du laboratoire ont néanmoins pu bénéficier durant la période d'une promotion IGR1 (AMU), deux promotions TCS (CNRS), une promotion AI (CNRS), une promotion IE1 (CNRS).

Ci-dessous nous présentons la répartition par thème (en équivalent temps plein travaillé recherche - ETPTR, un enseignant chercheur est compté pour 0.5) :

	Électromagnétisme et métamatériaux	Nanophotonique et composants optiques	Traitement de l'information et ondes aléatoires	Imagerie avancée et vivant
Effectifs au 30 juin 2016	5.025 E-C 3.23 chercheurs 0.8 ITA 7.1 CDD 5.5 doctorants	6.7 E-C 5.1 chercheurs 1.35 ITA 8 CDD 15.3 doctorants	5.025 E-C 1.23 chercheurs 0.35 IATSS 1 CDD 10.6 doctorants	7.75 E-C 8.44 chercheurs 1.5 ITA 14.90 CDD 19.6 doctorants
Personnels ayant quitté en cours	15 doctorants (367 mois) 23 CDD (812 mois)	1 ITA (46 mois) 17 doctorants (493 mois) 15 CDD (512 mois)	1 E-C (32 mois) 20 doctorants (454 mois) 8 CDD (512 mois)	24 doctorants (687 mois) 38 CDD (1868 mois)
Nombre de recrutements	25 CDD 10 doctorants	1 E-C 2 chercheurs 22 CDD 24 doctorants	7 CDD 14 doctorants	2 chercheurs 1 ITA 45 CDD 27 doctorants

La répartition montre un relatif équilibre de taille entre les différents thèmes. Nous notons, toutefois, un nombre plus grand de personnels qui participent au thème imagerie avancée et vivant, principalement en nombre de chercheurs, ce qui accroît d'autant la différence en ETPTR. Le thème traitement de l'information et ondes aléatoires est un peu plus petit et le faible nombre de chercheurs amplifie cette différence. Un point notable est la diminution du nombre de doctorants sur ce thème. En effet, il bénéficiait d'un apport important de doctorants par le programme China Science Council auquel participe Centrale Marseille. Or, depuis plusieurs années et avant la mise en place des ZRR, les refus du fonctionnaire sécurité défense (suite aux demandes d'autorisation) sont devenus la règle. L'acceptation des doctorants financés par ce programme est plutôt l'exception. Les autres thèmes bénéficiant d'un apport moindre de ce programme ont donc moins souffert de ces refus. Par ailleurs, on peut aussi noter une différence en termes de recrutements de doctorants selon les thèmes. Cela est lié à deux facteurs : d'une part l'attractivité auprès des meilleurs étudiants mais surtout le fait que ces thèmes disposent de financements sur contrats et projets plus importants.

Le tableau ci-dessous présente le type d'emploi occupé par les docteurs formés à l'Institut Fresnel. L'enquête a été effectuée en février 2015 (celle de 2016 n'ayant pas été faite à ce jour). On constate que la plupart de nos doctorants trouvent un emploi rapidement. Un autre enseignement est que la majorité des CDI sont dans le secteur privé.

Nos doctorants ont obtenus quatre prix de thèse de l'école doctorale, un prix de thèse d'Aix-Marseille Université, un prix de thèse de la DGA, un prix de thèse C'Nano national, un prix de thèse C'Nano PACA, et un prix de thèse de l'AMDT (l'Association Méditerranéenne pour le Développement des Transplantations).

Année soutenance	CDI (dont privé)	CDD	Recherche d'emploi
2011	6 (3)	6	2
2012	11 (5)	7	0
2013	7 (6)	8	3
2014	5 (5)	10	2

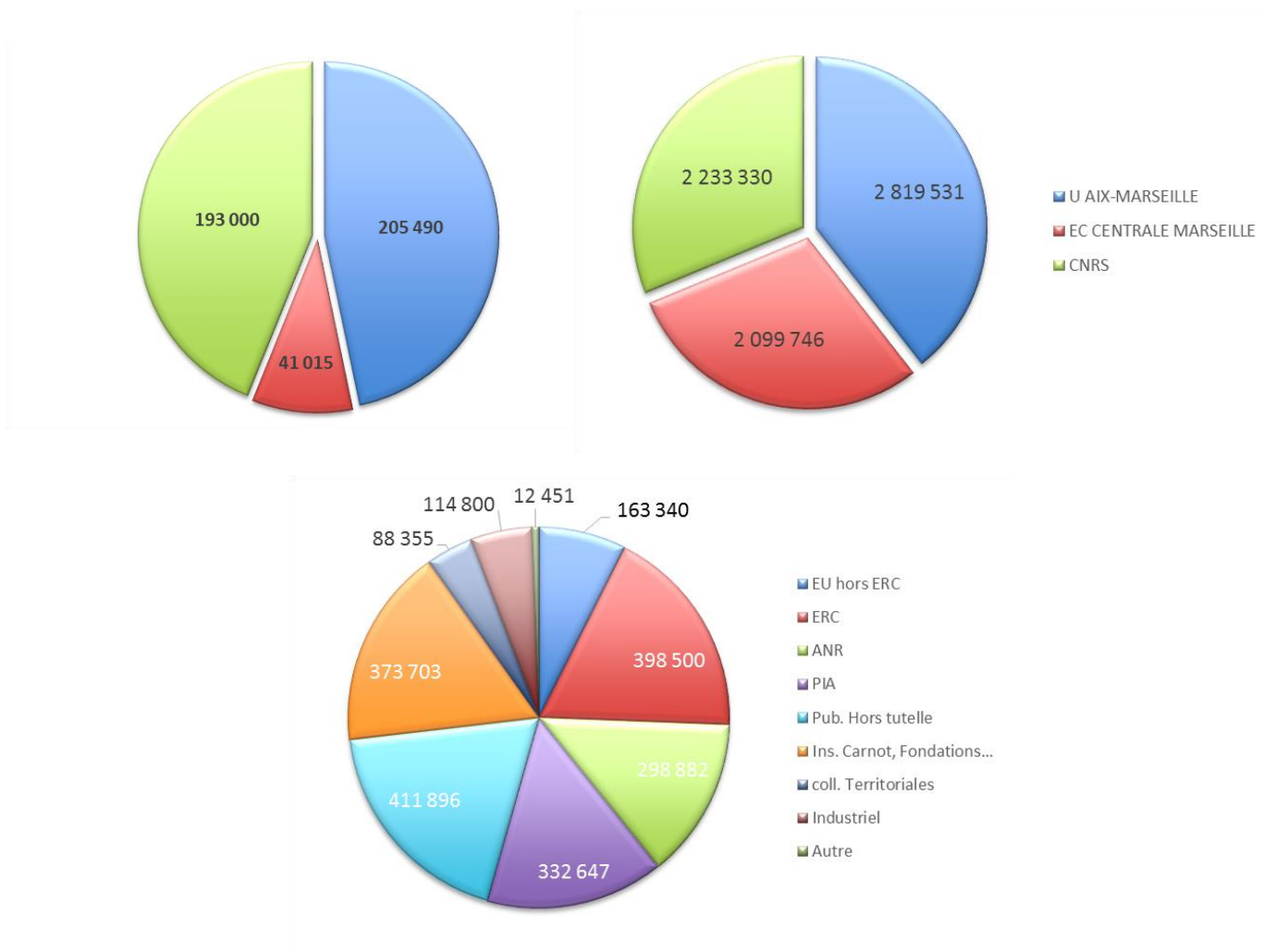
Type d'emplois occupés par les doctorants selon une enquête effectuée en février 2015. Dans la colonne CDI le nombre entre parenthèse indique le nombre de CDI dans le secteur privé.

Analyse et évolution des moyens financiers

Nous commencerons par une analyse de l'année 2015 qui est la dernière année budgétaire complète et nous présenterons ensuite les évolutions dans le temps, sur la durée de la période, mais aussi depuis la création de l'Institut Fresnel. Le choix de l'année 2015 plutôt que l'ensemble de la période permet d'éviter deux biais : d'une part certains financements (tels que le projet CPER) biaisent l'ensemble et, d'autre part, les modes de financement ont évolué durant la période. 2015 est donc, de fait, représentative des financements actuels de l'Institut Fresnel.

Le budget consolidé pour l'année 2015 est de 10 049 594 € HT hors reports. Sur cette somme, les dotations annuelles des établissements représentent 439 505 € qui se répartissent par tutelle selon le graphe ci-dessous. Les crédits sur contrat, programme ou opération particulière représentent 2 194 574 €. La répartition par type de source de financement est représentée ci-dessous. Enfin, le reste du budget est constitué de la masse salariale des

fonctionnaires d'état (7 415 515 €) présentée sur le graphique par établissement. Il faut ajouter que ces chiffres n'incluent pas les financements de la SATT-SE sur les projets de maturation qui représentent 986,5 k€ soit environ 180 k€ par an sur la période. Ces financements sont destinés à la maturation des technologies développées à l'Institut Fresnel. Par ailleurs, un certain nombre de frais échappent à ce budget : fluides, frais d'entretien des locaux (pour la partie à la charge du propriétaire), certains contrats d'entretien (compresseurs, salle blanche,...). Ces coûts sont actuellement à la charge exclusive d'Aix-Marseille Université.



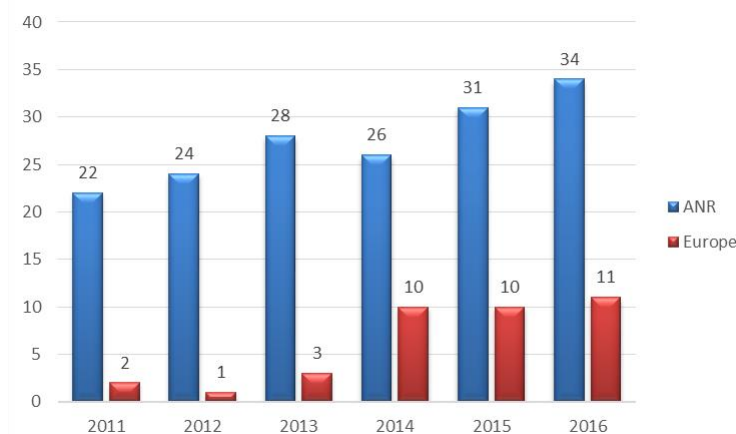
Crédits sur contrat, programme ou opération particulière (2015)

Quelques enseignements peuvent être tirés de cette analyse. Tout d'abord, la dotation annuelle des établissements représente environ 20% des recettes annuelles et 4,4% du budget consolidé. Les graphiques présentant l'évolution de cette dotation au cours du temps montre qu'elle a augmenté depuis la création de l'Institut Fresnel, et plus particulièrement à la création d'Aix-Marseille Université grâce à un choix politique de l'établissement dans ce sens. L'apparente diminution de la dotation du CNRS entre 2011 et 2012 est liée au fait que la dotation de 2011 incluait une contribution au projet Espace Photonique de 50 k€.

L'utilisation de cette dotation se répartit, pour 2015, de la manière suivante : 234 325 € permettent d'assurer le fonctionnement du laboratoire (dont personnels en CDD pour les services communs), 60 k€ (portés à 90 k€ en 2016) pour un appel à projet interne, et le reste est distribué au prorata des enseignants-chercheurs, chercheurs et ingénieurs de recherche permanents. L'appel à projet interne ("Fonds pour la Science") est géré directement par le conseil de laboratoire. Les projets sont financés à hauteur de 15 k€ répartis sur deux ans. Les objectifs sont de répartir l'argent en fonction du besoin et de financer des recherches de qualité qui nécessitent une aide (démarrage d'activité, nouvel arrivant...). Le format est le plus léger possible (une page et une courte présentation) et le taux de succès élevé (environ 55% la première année, plus de 80% la seconde).

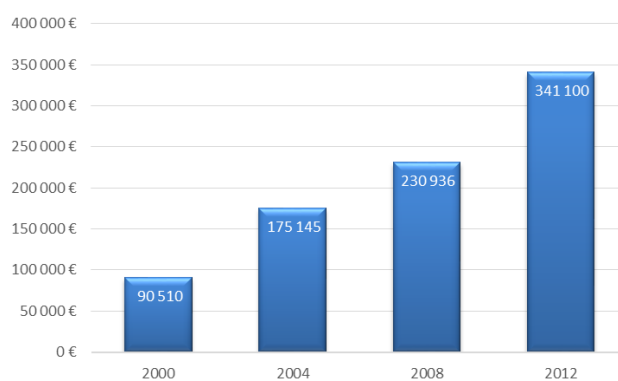
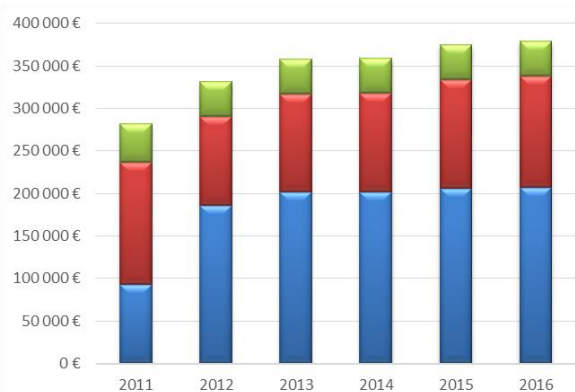
Les crédits sur contrat, programme ou opération particulière montrent que nos sources de financement sont variées, l'ANR représente un peu moins de 14% de la somme totale. C'est moins que le PIA (Idex, et infrastructures FLI et FBI) ou que l'ERC par exemple. La relative faiblesse des financements européens hors ERC s'explique par la fin de certains programmes qui n'ont pas encore trouvé de remplaçant (mais plusieurs projets qui ont été déposés sont, soit non retenus, soit en cours d'évaluation et plusieurs sont en cours de construction). Le second point relativement faible est

le financement industriel direct. Le constat, partagé par beaucoup d'acteurs, est que, depuis plusieurs années maintenant, les partenariats industriels se sont détournés de ce type de financement au profit de réponses communes à des appels d'offres publics (FUI, ANR, Europe,...). Ces deux points sont des points d'attention sur lesquels nous avons entrepris des actions de sensibilisation (avec les cellules Europe du CNRS et d'Aix-Marseille Université) et à travers nos engagements dans les structures telles que l'Institut Carnot STAR par exemple. Le graphique ci-dessous présente le nombre de projets déposés à l'ANR et aux appels à projet européens. Nous pouvons remarquer une nette augmentation du nombre de projets européens déposés que l'on peut corréliser aux actions de sensibilisation qui ont eu lieu. Le travail d'accompagnement dans ces appels d'offre devra se poursuivre et nous espérons en voir rapidement les effets sur le nombre de projets acceptés.

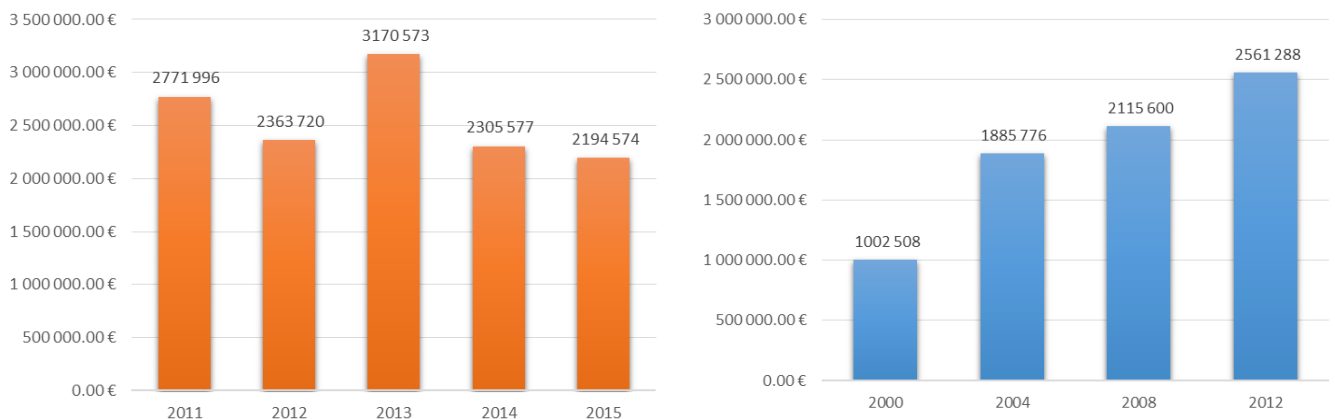


Nombre de projets déposés aux appels ANR et Européens

L'augmentation en moyenne sur la période des crédits sur contrat et programme est à mettre en relation avec l'augmentation du nombre de personnels non permanents de l'unité. Par ailleurs, une partie de cette augmentation provient du projet CPER "Espace Photonique". Il s'agit de la partie équipements scientifiques du projet (au total environ 1,8 M€ d'équipements sur la période), la partie bâtiment n'étant pas incluse dans le budget de l'Institut Fresnel. Il faut noter que cette augmentation induit des coûts indirects qui sont à la charge de l'unité et de l'établissement hôte.



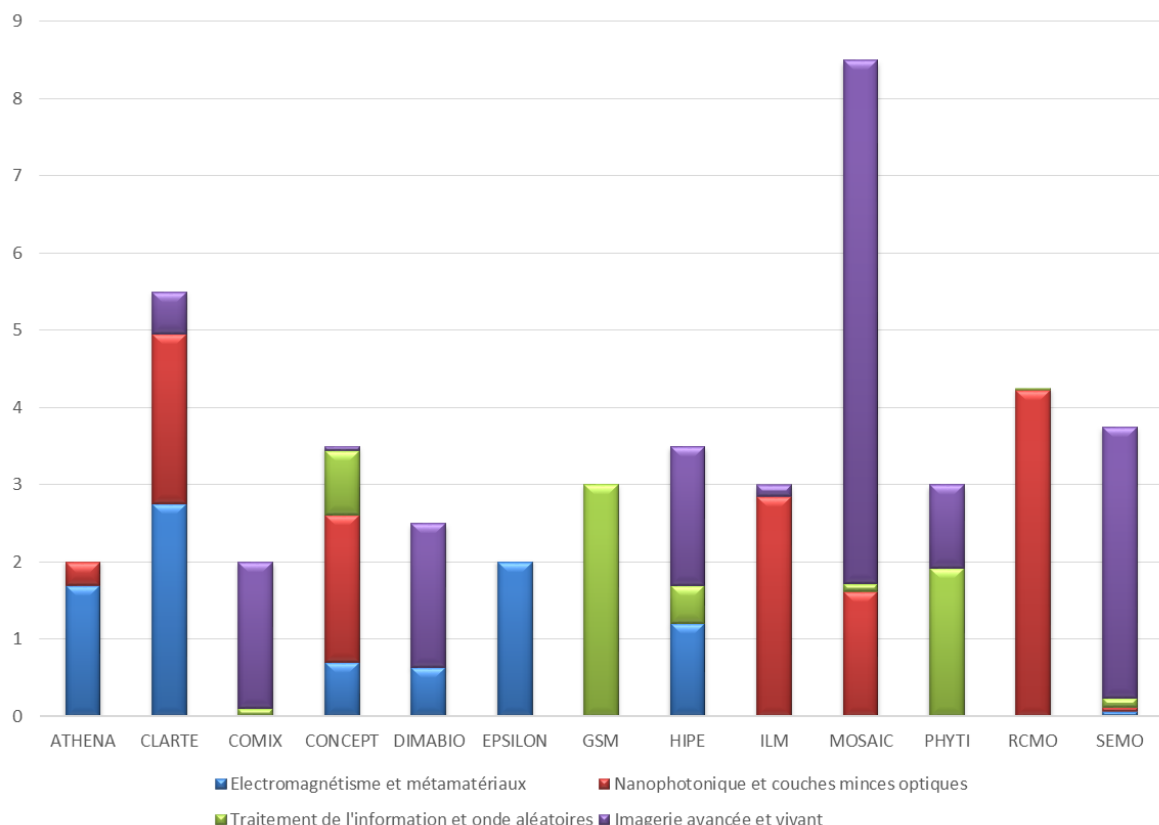
Gauche : Evolution des dotations annuelles des établissements durant la période. Droite : valeur moyenne sur la période considérée depuis la création de l'Institut Fresnel (la date indiquée est celle du début du mandat considéré).



Gauche : Evolution des recettes contractuelles annuelles durant la période. Droite : valeur moyenne sur la période considérée depuis la création de l'Institut Fresnel (la date indiquée est celle du début du mandat considéré).

Organisation et vie de l'unité

A la création des thèmes de l'Institut Fresnel, il a été choisi de faire subsister les équipes (structure matricielle). Le graphique ci-dessous présente la répartition des ETPTR par équipe et par thème. Nous pouvons ainsi constater que ces thèmes sont bien transverses dans le sens où la plupart des équipes participent à plusieurs thèmes. Cela contribue ainsi largement à décloisonner les équipes. Nous pouvons constater que les thèmes ne peuvent pas être vus comme des départements dans la mesure où la majorité des équipes participent à plusieurs thèmes.



Répartition des ETPTR par équipe sur chaque thème

Comme mentionné auparavant, les objectifs de la création des thèmes sont d'assurer une stratégie scientifique cohérente et partagée, de permettre une communication adaptée et, enfin, d'assurer une animation scientifique au sein de l'Institut Fresnel. Les thèmes ont chacun deux coordonnateurs dont le rôle est d'assurer que ces fonctions soient effectives.

Les équipes conservent, en revanche, les aspects opérationnels en ce qui concerne la gestion des moyens.

Animation scientifique

L'animation scientifique de l'Institut Fresnel comprend plusieurs éléments :

- Journées des doctorants de l'Institut Fresnel. Il s'agit de passer deux jours sur un site extérieur (Carry le Rouet ces dernières années) pendant lesquels les doctorants présentent leurs travaux (poster en 1ère année, présentation type "ma thèse en 180 secondes" suivi d'une session poster en deuxième année et présentation orale de 15 minutes en 3ème année). Nous comptons également quelques intervenants lors de cet événement interne, souvent un ancien doctorant mais aussi des extérieurs tel que la responsable Europe AMU, une éditrice associée de Nature Materials, un responsable du pôle de compétitivité Optitec...
- Séminaires de l'Institut Fresnel. Le format a évolué récemment mais il s'agit d'inviter des conférenciers du plus haut niveau possible (4 à 6 par an). Les propositions sont faites par les coordonnateurs de thème à la direction de l'Institut Fresnel.
- Séminaires internes organisés par les coordonnateurs des thèmes (un par mois). Ces séminaires commencent à peine mais seront un élément important dans le renforcement d'une culture "Institut Fresnel".
- Il faut ajouter à cela un nombre important de séminaires "opportunistes" à l'occasion d'une visite, d'une collaboration, etc. que nous essayons d'annoncer largement au sein du laboratoire.

L'annexe 7 détaille les séminaires qui ont eu lieu durant ces dernières années ainsi que les conférences organisées par des membres de l'Institut Fresnel.

Organisation conférences nationales et internationales

Les membres de l'Institut Fresnel ont une activité importante d'organisation de conférences, séminaires, workshops et écoles d'été. L'aide du laboratoire à travers le service communication y contribue sans aucun doute. Sur la période, 7 événements internationaux et 17 événements nationaux ou locaux ont été organisés ou co-organisés par des membres de l'Institut Fresnel (cf. annexe 7 pour le détail de ces événements).

Instances de pilotage

Les instances de pilotage de l'unité sont les suivantes :

Le bureau de direction est constitué du directeur, du directeur adjoint, de la responsable administrative et financière et de trois conseillers choisis par le directeur. Il gère l'ensemble des dossiers en cours et les interactions avec les établissements de tutelle et les partenaires.

Le Conseil de Laboratoire comprend vingt membres. Sa constitution précise et son rôle sont conformes aux recommandations des tutelles et sont détaillés dans le règlement intérieur en annexe. Il s'est réuni en moyenne 6,2 fois par an depuis janvier 2012 avec une périodicité plus élevée pour la rédaction de ce rapport (il a été sollicité une fois par mois).

Les responsables d'équipe sont systématiquement consultés lors des demandes de moyens puisqu'ils en ont la responsabilité (campagne DIALOG, demandes de postes aux tutelles, bourses de thèses de l'école doctorale...)

Une assemblée générale ordinaire est convoquée une fois par an. A cette occasion, nous faisons un bilan de l'année écoulée et discutons des orientations pour l'année à venir. Les questions relatives aux finances et aux emplois sont systématiquement abordées et le reste de l'ordre du jour dépend des sujets d'actualité (par exemple, prévisionnels des travaux dans le cadre de l'espace photonique).

Afin de nous aider lors des décisions stratégiques, nous avons créé un conseil scientifique externe constitué des personnes suivantes:

Rémi Carminati (Institut Langevin), Gilles Dambrine (IEMN), Daniel Dolfi (Thales RT), Christine Fernandez (XLIM), Frédérique de Fornel (ICB), Christian Jutten (GIPSA-Lab), Philippe Lalanne (LP2N), Hervé Maillotte (FEMTO-ST), Laurent Nicolas (CNRS, DAS INSIS), Isabelle Sagnes (LPN).

Nous avons sollicité ce conseil pour le travail de structuration des thèmes de l'Institut Fresnel.

FAITS MARQUANTS

1) Détection exaltée de molécules fluorescentes avec des antennes plasmoniques. L'activité a réalisé plusieurs premières mondiales, dont des valeurs record pour l'exaltation de fluorescence [Nature Nanotechnology 2013, 8, 512-516] et de contrôle de la directivité [Nano Letters 2011, 11, 637-644]. Ces deux références ont reçu le label " highly cited paper " d'ISI Web of Science. L'originalité de l'approche repose sur la combinaison de simulations numériques et de méthodes d'analyse de fluorescence inspirées de la biophotonique pour comprendre et manipuler les phénomènes physiques mis en jeu aux échelles nanométriques.

2) Thermoplasmonique pour le contrôle local de la température avec des nanostructures métalliques. Les points forts sont basés sur une combinaison de modèles numériques mêlant thermodynamique et électromagnétisme avec des expériences de microscopie mettant en œuvre une approche innovante pour cartographier l'élévation de température aux échelles nanométriques. L'activité est internationalement reconnue au meilleur niveau mondial avec nombreuses publications dont Laser & Photonics Reviews 2013, 7, 171-187, et 15 conférences invitées. Guillaume Baffou, leader de cette activité, a été distingué par la médaille de bronze du CNRS en 2015.

3) Développement de nouvelles méthodes, uniques et originales, pour l'imagerie pour des applications en physique, biologie et médecine (publications dans Nature Photonics, Physical Review Letters, PNAS..., brevets, médaille d'argent du CNRS). L'activité est fortement interdisciplinaire avec des apports de l'Institut Fresnel en instrumentation, traitement des images et transfert vers les sciences du vivant.

Les techniques d'imagerie émanant de l'Institut Fresnel sont issues d'idées originales largement reconnues au niveau international. Celles-ci sont le fruit de collaborations étroites entre expérimentateurs, théoriciens des processus d'imagerie et de l'analyse des signaux, biologistes et plus récemment médecins. Les chercheurs travaillant dans ce domaine sont parvenus à asseoir des concepts importants et fondamentaux pour l'imagerie en répondant aux défis actuels en super-résolution (par l'utilisation d'illuminations aléatoires, publié dans Nature Photonics), en imagerie structurale (par l'exploitation de la polarisation de la lumière, publié dans PNAS, et récompensé en 2016 par une médaille d'argent CNRS), en imagerie sans marquage (par inversion numérique des données et reconstruction ou par l'imagerie vibrationnelle, publié dans Physical Review Letters. et dans Nature Communications). Plusieurs de ces avancées sont aujourd'hui dupliquées dans les laboratoires de biologie marseillais (CIML, IBDM, INT, CERIMED, INMED) permettant ainsi d'adresser conjointement, par l'utilisation d'outils avancés et souvent uniques en imagerie, des questions encore ouvertes en biologie fondamentale et en santé.

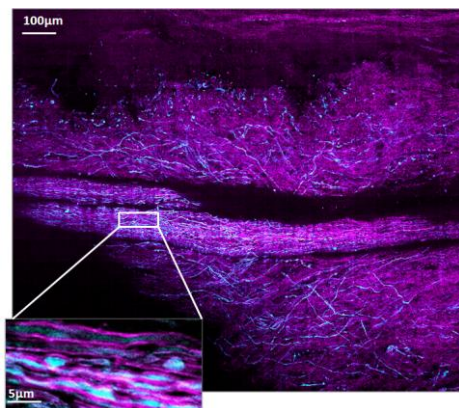


Image obtenue par microscopie à deux photons et CARS de moelle épinière de souris (collaboration Franck Debarbieux, Institut des Neurosciences de la Timone)

4) L'Espace Photonique est une plateforme technologique consacrée à l'Optique et la Photonique expérimentale. Il s'agit d'un espace unique en France pour la réalisation de composants à base de couches minces optiques. Il comprend en particulier un ensemble de 250 m² de salles blanches et grises dédiées à la fabrication et à la caractérisation de filtres optiques interférentiels réalisés grâce à des machines de dépôt sous vide à la pointe de la technologie. Le financement de cet Espace Photonique a été inscrit dans le Contrat de Plan État-Région. Le soutien de l'Europe, de l'État, des collectivités territoriales et des établissements de tutelle de l'Institut Fresnel a rendu possible cette opération stratégique pour le laboratoire. Grâce à ce nouvel outil, il est désormais possible de répondre à un nombre croissant de sollicitations toujours plus complexes. Cela se traduit par de très nombreux projets scientifiques, que ce soient avec des industriels (par exemple, ALSYOM) pour le développement d'une nouvelle plateforme laser Européenne (projet ELI-NP) ou bien des projets de Recherche et Technologie avec le CNES et ce afin de développer les technologies des futures missions spatiales (par exemple, filtres pixélisés...).

5) Les métamatériaux pour l'optique-électromagnétique introduits par le physicien anglais John Pendry permettent un contrôle accru de la trajectoire des ondes, avec les paradigmes de la lentille plate convergente par réfraction négative et de la cape d'invisibilité par anisotropie artificielle. L'Institut Fresnel a transposé ces concepts aux ondes hydrodynamiques, de plaques et sismiques pour la protection contre les vagues océaniques (dépôt d'un brevet français en 2015 avec la SATT-SE, avec extension PCT en 2016, et projet de maturation avec la SATT-SE en 2015-2016) et les ondes de surface de type Rayleigh (dépôt d'un brevet français en 2012 avec la SATT-SE, avec extension PCT en 2013). Cette thématique bénéficie du soutien du Conseil Européen de la Recherche (ERC Starting Grant ANAMORPHISM, 2011-2016). Une collaboration scientifique avec l'entreprise de génie civil MENARD a permis de valider les concepts théoriques de capes et lentilles sismiques avec des mesures expérimentales de terrain [Phys. Rev. Lett. 112, 133901 (2014)]. L'optique transformationnelle qui sous-tend l'invisibilité a, par ailleurs, été étendue aux processus de diffusion pour la chaleur et les espèces chimiques. Les travaux sur la chaleur et le mimétisme ont bénéficié d'un projet financé par l'Institut Carnot STAR (INVISITHERM) et du soutien de l'ANR (projet INPACT). Le projet BIOCLOAK (2015-2016) de l'initiative d'excellence A*MIDEX (porté par le Centre de Recherche en Cancérologie de Marseille) a permis de valider le contrôle de la diffusion de drogue avec des capes biochimiques dans des organismes vivants pour des applications dans le traitement contre le cancer (dépôt d'un brevet européen en 2016 avec INSERM Transfert).

STRATÉGIE ET PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES DU LABORATOIRE POUR LE FUTUR CONTRAT

Avant d'aborder la stratégie et les perspectives de l'Institut à proprement parler, nous présentons ci-dessous une analyse des forces, faiblesses, opportunités et menaces.

Points forts :

Qualité et positionnement scientifique de la recherche académique.
Pluridisciplinarité importante au laboratoire pratiquée depuis de nombreuses années.
Lien désormais naturel entre recherche fondamentale et recherche appliquée développées à l'Institut Fresnel.
Lien avec de nombreux partenaires industriels, particulièrement pour certaines activités.
Stratégie de réponse aux appels d'offre pour certaines activités.
Excellent taux d'insertion professionnelle de nos doctorants.
Services communs (fonction support) compétents et impliqués.
Master international permettant un lien formation/recherche important.
Deuxième Master mention "traitement du signal et des images" en cours de construction porté par un enseignant chercheur de l'Institut Fresnel.

Points à améliorer :

Nombre de recrutements hors mobilités (chercheurs et enseignants-chercheurs).
Nombre d'ITA/IATSS, en particulier sur les fonctions de soutien à la recherche.
Stratégie de réponse aux appels d'offre à améliorer pour certaines activités.
Augmenter les financements directs industriels.
Augmenter le taux de succès aux appels d'offre européens.
Augmenter le nombre de doctorants particulièrement pour certaines activités déficitaires.
Consolider les axes de formation et les liens formation/recherche sur l'ensemble des formations.

Possibilités liées au contexte :

Les appels d'offre H2020 ouvriront sur un certain nombre de thématiques qui nous concernent (en particulier KET Photonique mais pas uniquement).
Les appels d'offre du PIA fourniront de nouvelles opportunités pour lesquelles il faudra adopter une stratégie.
Notre participation au Département Hospitalo-Universitaire Imaging (DHU-Imaging) nous permet d'accroître nos liens avec le secteur médecine de l'aire d'Aix-Marseille.
La réflexion engagée sur la mise en place d'Instituts recommandée par le comité d'orientation stratégique d'AMU avec, en particulier, des réflexions autour de l'imagerie d'une part et des nanosciences d'autre part.
La pérennisation de l'Idex A*MIDEX et les possibilités de financement que cela représente.
La reconduction de l'Institut Carnot STAR.
L'existence et les services proposés par la SATT-SE.
Les excellentes relations avec les établissements de tutelle et entre les établissements de tutelle eux-mêmes.

Risques liés au contexte :

La pyramide des âges qui conduit à un nombre important de personnels en situation d'espérer légitimement une promotion.
Les contraintes budgétaires des établissements qui conduisent à un nombre restreint de postes (situation aussi liée à la pyramide des âges des établissements).
Les deux points ci-dessus conduisent à un risque de déstabiliser certaines activités / services si les seules possibilités de promotion sont par mobilité et à une nécessité accrue d'être rigoureux dans la gestion des emplois si nous voulons atteindre nos objectifs.
Difficultés liées à la pratique d'une activité pluridisciplinaire (les départements, instituts, écoles doctorales, etc. sont le plus souvent disciplinaires).

Stratégie et perspectives scientifiques de l'Institut Fresnel

Les projets scientifiques des thèmes seront détaillés dans les parties correspondantes. Nous présentons, dans cette partie, les points qui dépassent le cadre d'un thème. Bien évidemment, la déclinaison de ce projet scientifique devra veiller avant tout à ce que les points d'excellence qui ont été rappelés auparavant le restent.

Le projet scientifique de l'Institut Fresnel se dégage naturellement de la présentation par thèmes. Rappelons que l'objectif principal était de dégager une politique scientifique partagée au sein de l'Institut Fresnel.

La pluridisciplinarité trouve naturellement une place importante et fait partie intégrante de la stratégie de l'Institut Fresnel dans le domaine de l'imagerie. Dans ce domaine, nous avons acquis une solide réputation. Le projet propose d'amplifier la démarche pluridisciplinaire dans le domaine de l'imagerie biomédicale en intégrant une équipe centrée sur l'imagerie nucléaire composée de plusieurs médecins (2 PU-PH, 1 MC-PH et 6 praticiens hospitaliers de l'AP-HM et un physicien de l'AP-HM). Cette équipe s'intègre dans le thème "imagerie avancée et vivant" avec des liens étroits avec le traitement des images (thème "traitement de l'information et ondes aléatoires"), des ouvertures sur les problématiques d'inversion (reconstruction numérique, thème imagerie avancée et vivant) et dans une moindre mesure en terme d'instrumentation. Bien entendu, les questions d'imagerie multi-échelle et les approches multimodales ont toute leur place ici. Les personnels de cette équipe resteront localisés sur le campus Timone en raison de la proximité de l'hôpital et seront situés plus précisément dans les locaux de CERIMED (amené à devenir une UMS). L'activité "ophtalmologie" est actuellement déjà implantée dans ces locaux et cela renforcera donc fortement notre implantation et notre lien avec CERIMED et la communauté de l'imagerie biomédicale. L'existence de deux sites demandera une vigilance particulière pour que les acteurs puissent se connaître et collaborer. Il conviendra d'y veiller en y consacrant les moyens nécessaires. Aujourd'hui l'accès à une animalerie et un site habilité à recevoir des patients devient une condition pour que certaines recherches puissent se développer vers les applications (comme par exemple pour l'ophtalmologie). Proposer ces services aux chercheurs est un des objectifs de CERIMED (il n'est pas réaliste que l'équivalent puisse exister sur le site de Saint Jérôme à court ou moyen terme).

Ceci nous permettra d'avoir un positionnement rare dans le domaine de l'imagerie en couvrant depuis des aspects fondamentaux, aux développements instrumentaux, jusqu'à certaines applications en biologie et médecine en passant par les aspects de traitement des images. Nos activités de recherche couvriront l'ensemble des modalités principales : l'acoustique (projet en collaboration avec le LMA), l'imagerie nucléaire (TEP et TEMP, avec l'équipe qui nous rejoint), l'IRM (activité débutée au cours de cette période sur les antennes IRM) et bien entendu l'optique. Il faut ajouter à cela le traitement des images qui est transverse pour l'ensemble des modalités. Nous souhaitons ainsi nous positionner plus encore comme un acteur de référence dans ce domaine dont les enjeux scientifiques, sociétaux et industriels sont de tout premier plan.

Cette démarche est aussi en cohérence avec notre participation active (direction adjointe et direction pour la prochaine période) du Département Hospitalo-Universitaire *Imaging* (DHU-Imaging) et notre volonté d'être un acteur majeur de la structuration de l'imagerie biomédicale sur Marseille avec la création d'un "Institut" de l'Imagerie. Ces Instituts ont été recommandés par le comité d'orientation stratégique d'AMU (proches dans l'esprit des "Instituts de Convergence") pour assurer une meilleure visibilité des activités dans certains domaines.

Dans cette perspective, il semble important de renforcer le thème traitement de l'information et ondes aléatoires sans doute en particulier dans le domaine du traitement des images dans l'esprit de la co-conception instrument - traitement - application, démarche qui a déjà montré sa pertinence et qui pourrait amener de réelles ruptures dans le domaine de l'imagerie biomédicale.

Sur un autre sujet mais dans le même ordre d'idée, les acteurs des nanosciences à Marseille sont dans une démarche de structuration afin de rendre visible une activité qui est morcelée et peu lisible de l'extérieur. Notre intention est d'être un acteur majeur de cette construction. Nos activités théoriques et expérimentales en nanophotonique y trouveront certainement une place privilégiée (recouvre des aspects développés dans les thèmes électromagnétisme et métamatériaux ainsi que nanophotonique et couches minces optiques). Cela permettra de consolider et d'amplifier notre recherche dans ce domaine.

Comme cela a été mentionné auparavant, RENATECH a initié une démarche d'identification des points spécifiques en dehors des centrales du premier cercle et Marseille a été identifiée pour les couches minces optiques et les procédés lasers (LP3 et Institut Fresnel). Cela constitue aussi un élément de positionnement stratégique pour le développement de l'activité technologique au sein de l'Institut Fresnel. Cette démarche "plateforme" est essentielle pour assurer la pérennité de l'activité mais aussi pour en faire bénéficier l'ensemble de la communauté industrielle et académique (les demandes sont supérieures à nos possibilités actuelles).

Dans l'axe "composants optiques", il sera important de continuer à décloisonner les activités afin que le continuum partant des activités les plus fondamentales aux activités les plus appliquées permette un transfert le plus fluide possible des connaissances et des problématiques. Cela facilitera la création d'idées et l'émergence de sujets de rupture.

En termes de moyens, nous devons développer une meilleure stratégie de réponse aux appels d'offre pour l'ensemble des activités. Pour les appels d'offre européens, nous nous appuierons fortement sur les "cellules Europe" des établissements afin de pouvoir identifier les appels pertinents et sur lesquels nos chances sont raisonnables. L'objectif est de faire en sorte qu'une approche rationnelle des appels soit développée sur l'ensemble du laboratoire.

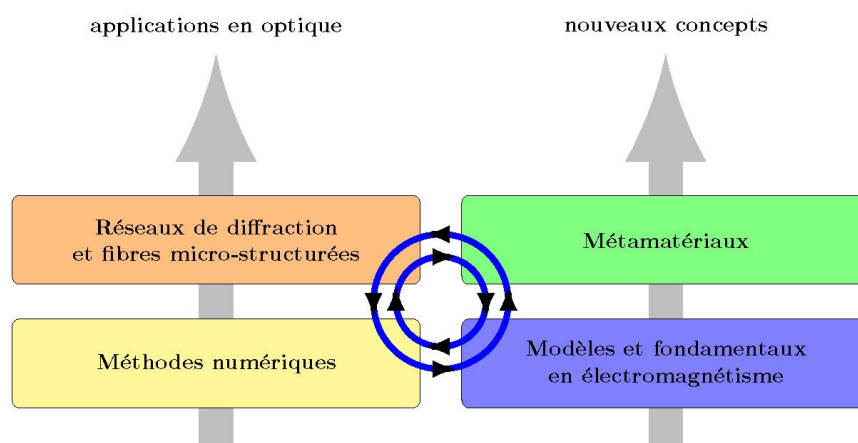
Notre politique scientifique devra être menée dans un contexte où l'emploi est contraint et, comme indiqué dans l'analyse qui précède, un point clé sera la gestion des emplois avec des équilibres qui seront complexes à trouver. Ainsi, plus que jamais, ces questions devront être traitées avec rigueur et transparence, toujours en fonction de la stratégie scientifique que nous nous sommes donnés.

THEME 1 - ELECTROMAGNÉTISME ET MÉTAMATÉRIAUX

Coordonnateurs : Boris Gralak et André Nicolet

RÉALISATIONS

Les futures applications et les nouveaux concepts de la photonique demandent de repousser les limites de la modélisation en optique électromagnétique classique : systèmes à décrire plus complexes et de plus grandes dimensions, effets physiques plus fins ou exaltés... L'étude des ondes électromagnétiques classiques est un thème de recherche développé à l'Institut Fresnel avec la double exigence d'élaborer des modèles rigoureux, faisant référence sur la scène internationale, et de proposer des nouveaux concepts et applications. Cette approche permet de produire des connaissances spécifiques, historiquement appliquées à la modélisation et à la compréhension des réseaux de diffraction et des couches minces optiques. Ces dernières années, la généralité des concepts et la précision des modèles, théoriques et expérimentaux, ont permis de multiplier les domaines d'applications non seulement en photonique et en électromagnétisme, mais aussi dans les principales sciences de l'ingénierie : hydrodynamique, mécanique et acoustique, thermique et diffusion de substances chimiques.



Ce thème se présente en quatre activités de recherche, qui s'enrichissent mutuellement, et qui visent à contribuer au ressourcement aussi bien des applications en optique que des nouveaux concepts. Des outils pointus d'analyse expérimentale en micro-ondes, des modèles théoriques originaux et des méthodes numériques rigoureuses sont spécifiquement développés à l'Institut Fresnel. Leur pertinence réside dans les réponses qu'ils offrent aux défis actuels de la photonique et des métamatériaux. Ces modèles et méthodes sont exploités pour concevoir des composants en optique (filtres à réseau, fibres optiques et autres), à la faveur de nombreuses collaborations nationales et internationales, que ce soit avec des partenaires académiques (notamment les grandes centrales de technologies du réseau RENATECH) ou industriels (CNES, PSA). Toutes ces activités de recherche sont fortement intégrées, comme le montrent les nombreuses publications qui comportent à la fois des aspects de modélisation, d'analyse et conception, de fabrication et de caractérisation. Les métamatériaux sont un exemple emblématique de cette approche globale de l'Institut Fresnel, réunissant modèles rigoureux, nouveaux concepts et applications prometteuses (collaborations avec l'industriel Ménard/Vinci et la startup *multiwave*, transfert technologique avec la SATT-SE), avec à la clé un important rayonnement national et international.

Les travaux de recherche effectués dans ce thème sont imbriqués avec ceux de tous les autres thèmes de l'Institut Fresnel avec de nombreuses interfaces : les nouveaux effets physiques avec la nanophotonique, la méthode intégrale de surface avec la télédétection et l'optique statistique, la méthode Monte Carlo avec l'imagerie des tissus vivants, la méthode intégrale de volume avec l'imagerie numérique, la méthode des éléments finis avec les composants en nanophotonique... la liste n'étant pas exhaustive.

Environ 25 enseignants-chercheurs, chercheurs et ingénieurs de l'Institut Fresnel (correspondant à environ 13 équivalents temps plein) participent à ces activités de recherche. Depuis 2011, ces travaux ont abouti à une production scientifique de plus de 140 publications, 8 brevets et 4 ouvrages. Une attention particulière est accordée à la diffusion de la culture scientifique, concernant des nouveaux résultats de recherche (métamatériaux, invisibilité), avec de nombreuses contributions dans des media nationaux (presse écrite, radio, télévision, web), des revues spécialisées de vulgarisation scientifique nationales et internationales, et des conférences grand public.

1. Modèles et fondamentaux en électromagnétisme

L'élaboration de modèles rigoureux pour l'optique électromagnétique est un axe de recherche historique de l'Institut Fresnel. Ces travaux de recherche fondamentale, effectués aux interfaces avec les mathématiques appliquées, les applications en photonique et les méthodes expérimentales et numériques, ont permis l'émergence de quatre axes de recherche en modélisation électromagnétique classique. Ces recherches proposent des solutions novatrices à des problématiques majeures qui se posent pour les futurs concepts et applications en photonique : la modélisation expérimentale rigoureuse à l'échelle des micro-ondes d'effets d'optique électromagnétique, la modélisation fine des structures résonantes en photonique (nouveaux modèles d'homogénéisation et étude des effets de la dispersion) et une modélisation rigoureuse des effets non-linéaires dans les structures guidantes.

Analogie micro-onde

Le principe de l'analogie micro-onde consiste à effectuer un changement d'échelle d'une longueur d'onde de quelques centaines de nanomètres (visible) vers une longueur d'onde de quelques centimètres (micro-ondes), en gardant le rapport entre la taille et la longueur d'onde constant. Ceci permet de modéliser des effets optiques dans des objets de dimensions initiales de quelques centaines ou dizaines de nanomètres. Les cibles sont simplement agrandies (par un facteur entre 10^4 et 10^5) en gardant le même indice de réfraction qu'aux longueurs d'onde optiques [Vai-1, Vai-2] (collaboration avec CETHIL). La géométrie des objets est ainsi plus facilement maîtrisable lors de la fabrication et ceci permet surtout de caractériser précisément l'interaction entre l'onde électromagnétique incidente et la cible en amplitude et en phase dans un environnement parfaitement contrôlé (chambre anéchoïque) [Tri-1]. Ce type de mesures peut être réalisé en champ lointain ou en champ proche afin d'étudier les phénomènes à proximité de la cible. En collaboration avec l'université de Cantabria (Espagne), les *conditions de Kerker* ont été mises en évidence expérimentalement pour la première fois [Gef-1] : les conditions de diffraction nulle en direction avant (*zero forward scattering*) et de diffraction quasi-nulle en direction arrière (*near-zero-backward scattering*) d'une particule sub-longueur d'onde ayant un fort indice de réfraction [Gef-1], conditions qui avaient été prévues théoriquement par Kerker en 1983 (figure 1.1). L'analogie micro-onde permet aussi d'étudier des objets de très grandes tailles en effectuant une translation d'échelle d'une longueur d'onde de quelques mètres vers une longueur d'onde de quelques centimètres, la taille des cibles étant réduite en proportion. Les études menées dans ce sens concernent la diffraction par des arbres en collaboration avec le L2E (UPMC) [Bel-1] ou l'interaction d'une onde électromagnétique avec la comète "Tchouri" en collaboration avec l'IPAG (Grenoble) [Science 349, 6247 (2015)].

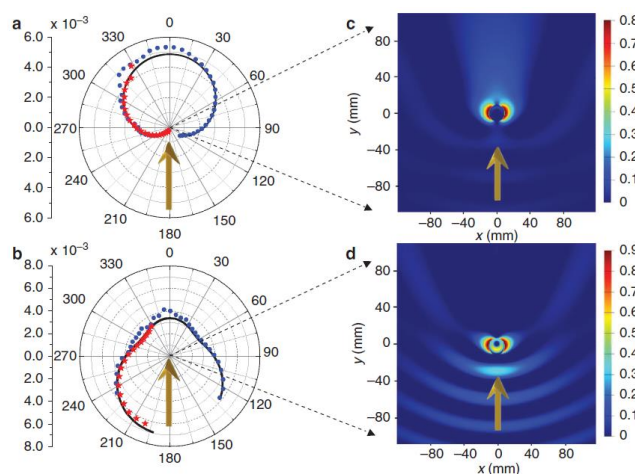


Figure 1.1 : Mise en évidence expérimentale des conditions de Kerker [Gef-1 : Nature Communications 3, 1171 (2012)].

Nouvelles approches d'homogénéisation

Les effets physiques sous-jacents de la photonique moderne sont le résultat de résonances engendrées ou modifiées par la structuration des matériaux : miroirs de Bragg, réseaux de diffraction, cristaux photoniques, métamatériaux, plasmonique et métasurfaces. Une modélisation simple de ces effets par un nombre réduit de paramètres effectifs homogènes nécessite d'imaginer de nouvelles approches d'homogénéisation qui restent valides aux fréquences de résonances ou en régime de Bragg. Les recherches menées à l'Institut Fresnel ont permis de proposer plusieurs solutions originales, notamment en collaboration avec l'université d'Akron (USA) et les départements de mathématiques appliquées d'Imperial College London et de Liverpool University (UK).

Une première approche a permis de modéliser des structures 1D ou 2D (cristaux photoniques) en prenant en compte l'effet des interfaces, et d'obtenir les coefficients de réflexion et de transmission. Ces nouvelles méthodes reposent sur la définition et le calcul de plusieurs paramètres effectifs, éventuellement anisotropes : perméabilité, indice de propagation, impédance, couplage magnéto-optique... En 1D, un développement perturbatif à ordre élevé a montré la possibilité d'obtenir du magnétisme et du couplage magnéto-optique artificiels avec un faible contraste [Liu-4]. Il a également été montré pour la première fois que les paramètres effectifs vérifient à toutes les fréquences la causalité

et la passivité [Liu-2], ouvrant ainsi la voie à une nouvelle modélisation des structures périodiques utilisant les relations de Kramers-Kronig. Pour les cristaux photoniques 2D, la méthode proposée consiste à minimiser la différence entre le champ diffracté par le cristal et celui par un milieu homogène caractérisé par les paramètres effectifs recherchés. Cette méthode a permis d'établir un nouveau critère de validité de l'homogénéisation indiquant que l'erreur induite par le modèle homogène augmente avec le magnétisme artificiel [Tsu-1]. Les résultats les plus récents ont défini des limites de l'homogénéisation des cristaux photoniques aux fréquences des bandes élevées [Mar 1].

La deuxième approche, de type perturbative en bord de bande, dite d'homogénéisation hautes fréquences, est mise en œuvre à l'Institut Fresnel pour modéliser les propriétés effectives des structures périodiques en régime de Bragg [Cra-2, Cra-3, Cra-4, Ant-2, Tri-2, Tri-4] (optique et élasticité).

A noter que les percées effectuées en électromagnétisme ouvrent la voie vers des métamatériaux bi-anisotropes en optique régis par les équations de Maxwell-Tellegen et aussi vers des métamatériaux élastodynamiques régis par les équations de Willis modifiées.

Etude des effets de la dispersion

Les nouvelles structures photoniques résonantes sont modélisées par des paramètres homogènes effectifs (voir paragraphe précédent) qui sont par nature dispersifs, c'est-à-dire dépendant de la fréquence. Parallèlement à ces modèles, des recherches ont été engagées à l'Institut Fresnel pour comprendre les effets de ce phénomène de dispersion dans les nouveaux composants. Ces recherches reposent sur des connaissances originales construites depuis qu'a été établi un cadre étendu des équations de Maxwell pour les métamatériaux [J. Math. Phys. 51, 052902 (2010)], qui permet de " simplifier " la dispersion et l'absorption (en collaboration avec AMOLF, FOM-Institute, Amsterdam).

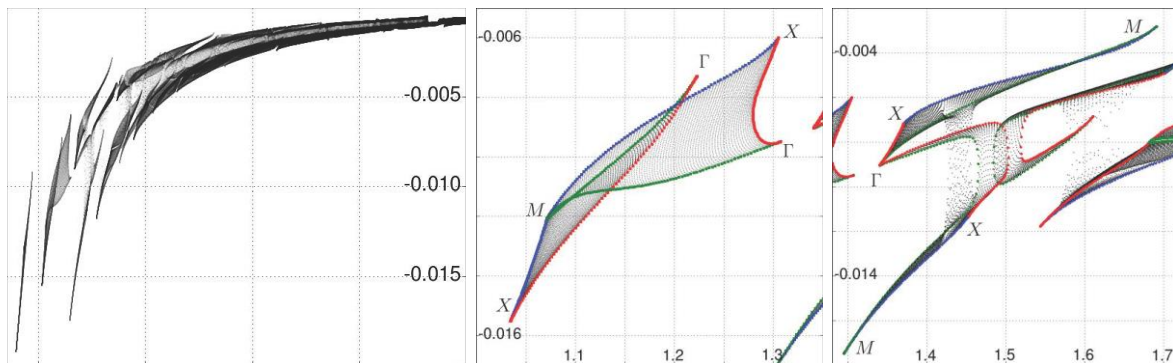


Figure 1.3 : Spectre des bandes de résonances complexes dans un cristal photonique de tiges carrées de métal de Drude, avec zoom sur les bandes 2-3 (centre) et 4-5 (droite) : ΓXM sont les points de symétrie de la zone de Brillouin.

Ce cadre étendu a été appliqué à la lentille parfaite d'indice négatif pour établir une formulation bien posée du problème et pour montrer rigoureusement les limites de la résolution infinie en régime temporel [Gra-3]. En lien avec l'homogénéisation hautes fréquences, ce cadre a été utilisé pour établir une preuve rigoureuse des propriétés de causalité, de passivité et de comportement asymptotique aux hautes fréquences pour les paramètres effectifs des multicouches [Liu-2]. Ces nouvelles connaissances permettent aussi de revisiter la problématique ancienne de la propagation du champ électromagnétique dans les milieux dispersifs dans de nouveaux contextes : dans la lentille plate d'indice négatif [Gra-3] et dans des systèmes invisibles conçus à partir de l'optique de transformation, avec la mise en évidence théorique d'analogues des précurseurs de Brillouin [Gra-1]. Enfin, une version spatio-temporelle des relations de Kramers-Kronig, étendue au vecteur d'onde, a été utilisée pour proposer une nouvelle technique de reconstruction de la phase à partir de l'intensité [Gra-2].

Ces nouvelles connaissances sont aussi exploitées pour augmenter les possibilités des codes numériques. Le cadre étendu des équations de Maxwell a été implémenté dans la méthode des éléments finis pour calculer de façon très efficace les relations de dispersion des cristaux photoniques 2D avec dispersion et absorption [Bru-1] (figure 1.3). Ce transfert de connaissances théoriques vers les méthodes numériques est le point de départ du calcul des modes quasi normaux dans les systèmes dispersifs (voir le paragraphe sur la méthode des éléments finis dans la section 2).

Non-linéarités spatiales

La modélisation des effets non-linéaires a été engagée en 2005 à l'Institut Fresnel pour étudier des fibres micro-structurées en présence d'un effet Kerr (voir le paragraphe sur les fibres micro-structurées dans la section 3). Avec l'avènement de la plasmonique et des forts confinements des champs, des situations avec des variations d'indice de 170%, engendrées par la non-linéarité, ont été récemment mises en évidence [Science **352**, 795 (2016)]. Une modélisation rigoureuse des effets spatiaux des non-linéarités optiques est alors nécessaire, au-delà de l'approche courante où seule l'aire effective des modes est prise en compte.

Une nouvelle méthode semi-analytique a été développée à l'Institut Fresnel et permet des études rigoureuses et rapides de nombreuses configurations [Wal-1], et a été validée par comparaison avec la méthode des éléments finis [Wal-4]. Cette méthode a été appliquée à l'étude de guides d'onde plasmoniques non-linéaires [Wal-4, Wal-5], où de forts effets non-linéaires spatiaux ont été exhibés avec l'apparition d'un mode asymétrique par brisure de symétrie dans un guide symétrique [Wal-3] ou l'apparition de mode de type TE dans des guides planaires à partir d'une puissance critique.

Par ailleurs, une extension de la méthode numérique FDTD (pour *Finite Difference Time Domain*) a été développée afin de traiter correctement le problème de la propagation temporelle non-linéaire de ces solutions couplant partie solitonique et partie plasmonique. Un résultat précédemment obtenu dans l'approximation scalaire de faible guidage a été généralisé au cas vectoriel des structures plasmoniques non-linéaires, à savoir que le mode asymétrique est le mode stable alors que le mode symétrique est instable passé la bifurcation [Wal-2]. Enfin, de nouvelles structures ont été proposées pour obtenir une réduction d'un facteur 3 des pertes de guidage, véritable verrou des guides plasmoniques [Els-1].

2. Méthodes numériques

La modélisation numérique des ondes électromagnétiques classiques en présence de matière structurée est une activité de premier plan qui s'appuie sur des forces importantes au sein de l'Institut Fresnel. Deux grandes familles de méthodes numériques sont développées et utilisées.

La première regroupe des méthodes spécifiques telles que la méthode différentielle, la méthode de Mie, la méthode multipolaire, les méthodes modales... qui sont spécialement adaptées à une géométrie particulière : symétries sphérique, cylindrique ou par rapport à un groupe de translations (pour les réseaux et les cristaux photoniques). Ainsi, chaque problème pourra être traité de façon optimale avec une méthode spécifique pour réduire les temps de calcul, atteindre des précisions requises, et explorer une large gamme de paramètres (optimisation). Ces méthodes numériques sont maintenant matures et leur pertinence réside dans leur exploitation à l'Institut Fresnel pour concevoir de nombreux composants optiques (filtres, fibres et autres) : ces activités de conception sont présentées dans la section suivante " Réseaux de diffraction et fibres micro-structurées ".

La deuxième famille regroupe des méthodes générales reposant sur un maillage de l'espace comme les méthodes intégrales et la méthode des éléments finis. Avec les capacités actuelles en matière de calcul numérique (mémoire et puissance de calcul), cette deuxième famille de méthodes s'avère réellement pertinente pour considérer non seulement les géométries les plus générales, mais aussi des géométries plus simples comportant des imperfections comme la rugosité, ou encore tout type de matériau : permittivité et perméabilité inhomogènes, anisotropie, gradients d'indice, linéaire et non-linéaire...

Les principaux efforts de développement de codes numériques effectués à l'Institut Fresnel portent sur plusieurs méthodes générales complémentaires. Les méthodes intégrales de volume et de surface sont particulièrement adaptées aux problèmes de diffraction, avec un avantage à l'intégrale de volume pour les matériaux diélectriques et un avantage à l'intégrale de surface pour les métaux fortement ou infiniment conducteurs. Si la méthode des éléments finis peut également modéliser des problèmes de diffraction avec les couches parfaitement adaptées (ou PMLs pour *Perfect Matched Layers*), elle est particulièrement adaptée au calcul de modes : modes guidés, modes dans les structures périodiques, ou modes à perte dans des structures ouvertes (avec des PMLs). La méthode Monte Carlo permet quant à elle de modéliser les milieux diffusants ou désordonnés.

Méthode intégrale de volume et forces optiques

La méthode intégrale de volume (ou DDA pour *Discrete Dipole Approximation*) repose sur un maillage volumique de l'objet diffractant combiné avec un calcul de la fonction de Green, avec l'hypothèse que le champ électrique est constant à l'intérieur de chaque volume élémentaire. Simple et robuste dans sa formulation, la méthode DDA est extrêmement pertinente pour modéliser les problèmes de diffraction électromagnétique les plus généraux, la seule limitation étant les variations trop rapides du champ (par exemple dans les métaux où la méthode intégrale de

surface peut être mieux adaptée). Un code numérique utilisant cette méthode DDA est développé sur le long terme à l'Institut Fresnel, avec notamment une optimisation très poussée du calcul des fonctions de Green qui conduit à des performances faisant référence dans la communauté internationale pour des objets de volume dépassant plusieurs centaines ou milliers de longueurs d'onde cube. En particulier, les développements récents de ce code numérique conduisent à une réduction significative du temps de calcul du champ lointain diffracté par les grands objets [Cha-1].

Le code de calcul numérique développé à l'Institut Fresnel se distingue également par sa généralité : régimes harmonique et temporel [Cha-3], géométrie quelconque, anisotropie, et surtout calcul des forces optiques dans des situations très complexes (par exemple dans des capes d'invisibilité [Cha-6, Cha-9]). Les travaux de recherche menés sur les forces optiques [Cha-2, Cha-4, Cha-6, Cha-8, Cha-9, Rah-1], en collaboration avec l'université de Sydney, sont largement reconnus au niveau international avec notamment des résultats sur les pinces optiques [Cha-2]. Enfin, couplé à des algorithmes d'inversion, le code numérique DDA est l'outil de base d'activités de recherche en reconstruction numérique d'image [Zha-1, Zha-3, Zha-3]. Cette application de la méthode numérique DDA est présentée dans le thème "Imagerie avancée et vivant".

Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis (FEM pour *Finite Element Method*) est extrêmement générale puisqu'elle peut s'appliquer quasiment à tous les types d'équations associées à des géométries arbitraires et des propriétés matérielles à peu près quelconques (y compris non-linéaires), et peut traiter aussi bien le calcul de modes que des problèmes de diffraction. Les recherches effectuées à l'Institut Fresnel contribuent à développer la plate-forme spécifique de logiciels libres tels que Gmsh/GetDP (en collaboration avec l'université de Liège), mais aussi du code *ab initio* pour pouvoir faire des développements algorithmiques très spécifiques. Les derniers développements de ces codes FEM portent sur des problématiques majeures de la modélisation numérique en électromagnétisme.

Une étape décisive a été franchie dans la modélisation des systèmes résonnants en photonique en utilisant les modes associés aux résonances. Cette approche présente l'intérêt de développer le champ sur les modes "naturels" du système auxquels peut être attribué du sens physique. Elle repose sur l'utilisation des PMLs qui permettent de simuler rigoureusement les domaines non bornés [Via-4] et, combinée avec une formulation des équations en problème spectral, de déterminer les modes quasi-normaux du système (ou QNMs pour *quasi-normal modes*) associés à des fréquences complexes. Ces travaux posent les fondations du développement en QNMs [Via-2] et de l'analyse modale des systèmes résonnants en photonique. Il est alors possible de modéliser efficacement la réponse du système à toute excitation dans une large gamme spectrale, avec des applications pour le filtrage infra-rouge [Via-1, Via-3] et la modélisation de la cavité de S. Haroche [Phys. Rev. A **90**, 033806 (2014)].

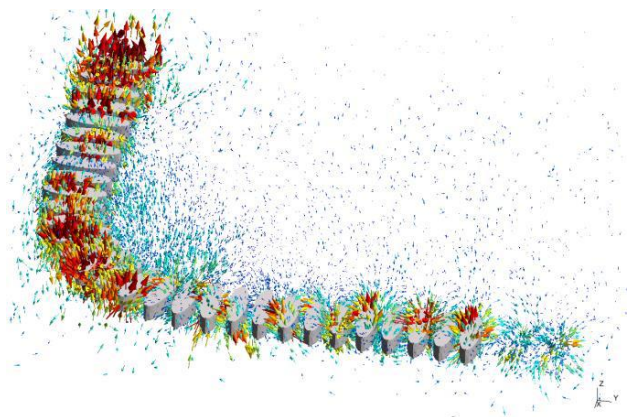


Figure 2.2. Champ électrique (excitation en champ proche en bout de chaîne en haut de l'image) se propageant le long d'un guide d'onde segmenté à forte courbure - comparable à la longueur d'onde ; calcul réalisé avec les codes libres Gmsh/GetDP.

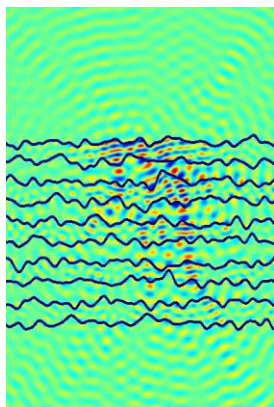
La question stratégique de traiter les grands volumes a été également abordée. Une technique qui semble prometteuse est la décomposition de domaines (DDM) qui consiste à diviser un gros problème en petits problèmes couplés qui communiquent d'une manière bien choisie pour permettre la convergence du problème global. La variante FETI est développée à l'Institut Fresnel [Voz-1, Voz-2] notamment pour une résolution efficace de problèmes inverses (la géométrie et/ou les propriétés matérielles sont reconstruites à partir de mesures du champ électromagnétique) qui nécessitent de boucler sur la résolution de problèmes directs qui doivent dès lors être résolus le plus efficacement possible (voir le paragraphe sur l'imagerie par reconstruction numérique dans le thème "Imagerie avancée et vivant").

Méthode intégrale de surface

La méthode intégrale de frontière (ou de surface) est au fondement de la théorie de la diffraction. Moins générale que la méthode des éléments finis ou la méthode intégrale de volume, elle est la plus adaptée et la plus performante pour les calculs rigoureux de diffraction des ondes électromagnétiques par des surfaces rugueuses et / ou métalliques. Elle permet à la fois de modéliser finement la rugosité d'une interface, avec prise en compte locale du tenseur de

courbure, et de traiter des domaines de calcul très étendus, couvrant des centaines de longueurs d'onde de côté. Couplée avec une méthode de Monte-Carlo, elle permet d'accéder à la statistique du champ diffracté par une surface rugueuse aléatoire et l'étude des phénomènes d'ordre élevé associés comme la rétrodiffusion exaltée ou la localisation d'Anderson.

Au fil des ans, l'Institut Fresnel a développé sur cette méthode une expertise unique au niveau international. Depuis 2011, les résultats obtenus portent sur la situation critique (mais stratégique pour les applications) que constitue l'incidence rasante [Mir-1, Sai-1] et ont été utilisés pour modéliser de nombreuses situations en télédétection, imagerie numérique et optique statistique.



Ces modèles sont appliqués à la surface océanique (voir la partie sur la télédétection dans le thème "Traitement de l'information et ondes aléatoires") et en profilométrie optique surper-résolue (voir la partie sur l'imagerie par reconstruction numérique dans le thème "Imagerie avancée et vivant"). Plus récemment, la méthode intégrale de frontière a été appliquée à la lumière partiellement cohérente et partiellement polarisée. Dans le cadre des activités d'optique statistique (voir la partie sur la polarisation et la cohérence optique du thème "Traitement de l'information et ondes aléatoires"), cette méthode permet d'étudier le régime séparant diffraction perturbative et diffusion lambertienne.

Figure 2.3 : Diffraction par un empilement de surfaces rugueuses (illumination : faisceau gaussien).

Méthode Monte Carlo et milieux diffusants

La modélisation numérique du comportement de la lumière dans les milieux diffusants est une problématique de première importance. Les applications qui nécessitent ces modèles sont nombreuses : caractérisation en temps réel de la rugosité des composants microélectroniques, compréhension et optimisation de la diffusion et l'absorption dans les milieux complexes comme les crèmes solaires et la peau, ou encore caractérisation de la propagation de la lumière dans les tissus biologiques.

Une première approche repose sur la combinaison de différentes méthodes : approximation de Born avec la méthode différentielle 3D, combinaison de plusieurs méthodes numériques (méthode différentielle, développement multipolaire et théorie de Mie), et étude expérimentale [Lec-1]. Des formules de crèmes solaires optimisées ont ainsi été proposées : pigments enrobés comme particules optimales (en guise des nanoparticules potentiellement toxiques), optimisation de paramètres (répartition, concentration et taille), et qualité de l'étalement de la crème et de l'hydratation de la peau [Deu-1, Deu-2].

La deuxième approche repose sur l'utilisation de la méthode de Monte Carlo pour résoudre l'équation de transfert radiatif sous sa forme vectorielle, et calculer la propagation de la lumière et du vecteur de Stokes qui contient l'information sur la polarisation. L'exploitation de ce modèle a permis de proposer une technique de filtrage polarimétrique permettant de remonter à l'information sur la profondeur de tissus sondé selon l'ellipticité de la polarisation de l'illumination. Grâce à une étude théorique réalisée sur une large gamme de propriétés optiques [Reh-1], il a été montré que, plus l'ellipticité de la polarisation de la lumière incidente est grande, plus le volume sondé est grand, avec une profondeur de pénétration directement contrôlable par un simple réglage des éléments optiques du système imageur. Enfin, des simulations Monte Carlo sont également utilisées pour calculer des matrices de sensibilités reliant les perturbations sur les paramètres aux mesures. Cette méthode est appliquée au développement d'une nouvelle approche tomographique résolue en polarisation, et au problème inverse, à savoir remonter aux propriétés optiques du système diffusant examiné [Mac-1] (application en imagerie décrite dans le thème "Imagerie avancée et vivant").

3. Réseaux de diffraction et fibres micro-structurées

L'étude des structures périodiques repose sur l'utilisation de méthodes numériques rigoureuses et efficaces, qui ont été élaborées et programmées à l'Institut Fresnel dans la période 1970-2010 : méthode différentielle, méthodes modales, méthode intégrale et méthode des éléments finis. Ces méthodes numériques sont largement reconnues dans la communauté internationale, comme l'attestent les ouvrages sur les réseaux de diffraction [*Gratings: Theory and Numeric Applications*, ISBN 2853999434, éditions 2013 et 2014] et sur les fibres optiques micro-structurées [*Foundations of Photonic Crystal Fibres*, ISBN 1848167288, 2012]. Ces méthodes et ces connaissances, devenues matures, sont exploitées pour mettre en évidence et comprendre des nouveaux effets physiques (exaltations de champs, transmission extraordinaire, absorption totale), et nourrir les travaux sur les nouvelles applications en photonique. Les recherches effectuées à l'Institut Fresnel sont notamment à la pointe pour modéliser numériquement et concevoir des filtres à réseaux résonnants, des fibres micro-structurées et des composants optiques avec de

nouvelles fonctions. Ces composants nano-structurés sont fabriqués et caractérisés dans les grandes centrales technologiques du réseau RENATECH (LAAS, IEMN, LPN, IEF) et à l'ISCR (Rennes).

Les travaux de cette thématique reposent sur les nombreuses collaborations avec des spécialistes de la modélisation (ces travaux sont un pilier du LIA ALPhA avec CUDOS, Sydney), avec les équipes développant les techniques de fabrication et de caractérisation en photonique les plus avancées (laboratoires du réseau RENATECH, membres du GDRI Chine-France PHOTONET, ISCR) et avec des industriels utilisant les nouveaux composants optiques (CNES, PSA).

Analyse d'effets physiques

Les réseaux de diffraction permettent de coupler la lumière aux plasmons de surface et d'obtenir une interaction forte entre la lumière et la matière. Les effets physiques "extraordinaires" qui en découlent sont modélisés et analysés finement à l'Institut Fresnel. Différents réseaux métalliques ont été proposés pour obtenir théoriquement des exaltations de champ de plusieurs ordres de grandeur : une intensité multipliée par 10^4 a été obtenue au sommet de cônes disposés sur un réseau en utilisant des plasmons de surface [Bru-3] ; et une exaltation d'intensité de 10^3 a été obtenue en utilisant des plasmons localisés dans les réseaux sinusoïdaux profonds [Pop-1].

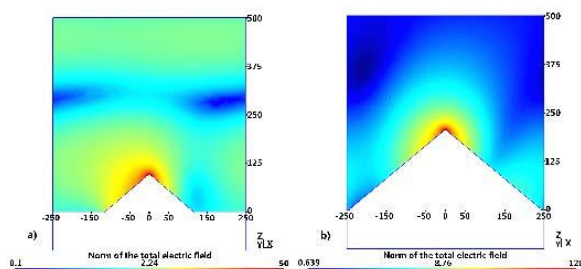


Figure 3.1 : Champ électrique (à 633 nm) en présence d'un réseau de cônes d'or (hauteur du cône : 95 nm à gauche et 205 nm à droite) effectué avec la méthode des éléments finis développée à l'Institut Fresnel.

Le phénomène de transmission extraordinaire a été analysé dans des réseaux 2D de trous dans des plaques métalliques, avec une explication physique simple du phénomène proposée dans [Dan-1] et une transmission de presque 100% obtenue dans [Ala-1].

Enfin, une étude comparative de structures métalliques complémentaires a montré que l'absorption totale pouvait être obtenue aussi bien avec des réseaux de trous suffisamment profonds (par rapport à la longueur d'onde) qu'avec des réseaux de plots séparés par des sillons très étroits [Feh-1]. Ces effets physiques sont utilisés à l'Institut Fresnel pour concevoir de nouvelles applications en nanophotonique. En particulier, le mécanisme de transmission extraordinaire et les exaltations de champ sont utilisés pour augmenter la fluorescence des molécules et permettre leur détection en milieu dilué, par exemple biologique (activités présentées dans le thème "nanophotonique et couches minces optiques").

Filtres à résonance de mode guidé

Les réseaux à résonance de mode guidé (ou GRMG pour *Guided Mode Resonance Grating*) sont étudiés à l'Institut Fresnel depuis les années 80. Les connaissances uniques développées, notamment lorsque plusieurs modes guidés sont excités, permettent aujourd'hui de concevoir des filtres GRMG présentant des performances originales. Ces structures se composent de plusieurs couches de matériaux diélectriques sur lesquelles des réseaux sont gravés (voir figure 3.2). Les réseaux ont le rôle de coupler la lumière incidente avec les modes guidés dans les couches diélectriques, avec pour effet des résonances dans les spectres de transmission ou de réflexion.

Le premier avantage est la possibilité d'obtenir des résonances très étroites, avec des facteurs de qualité mesurés dépassant sans difficulté 5000. Le deuxième avantage est la possibilité d'atteindre une réflexion de 100% si les matériaux diélectriques présentent des pertes négligeables et si la structure présente les symétries requises. Ces réseaux GRMG sont donc très intéressants pour les applications de filtrage en espace libre nécessitant une bande étroite : spectroscopie, capteurs, lasers...

Les autres caractéristiques de ces réseaux GRMG sont leur faible tolérance angulaire et leur dépendance à la polarisation qui, selon les applications visées, peuvent être bénéfiques ou dommageables. Une première classe de réseaux GRMG a été proposée avec deux réseaux lamellaires croisés pour obtenir des filtres indépendants de la polarisation et accordables en fonction de l'angle d'incidence sur plusieurs dizaines de nanomètres (publications [Mon-1, Feh-2] et un brevet).

Ces réseaux ont été fabriqués au LAAS Toulouse dans le cadre d'une collaboration et d'un programme de recherche financé par le CNES. Une deuxième classe de réseaux GRMG a permis de proposer une solution au verrou de la faible tolérance angulaire en combinant un réseau GMRG tronqué avec une cavité à miroirs de Bragg : cette deuxième classe de structure permet de multiplier la tolérance angulaire par 10 en comparaison avec le même réseau GMRG périodique et infini [Ras-1, Ras-2].

Ces derniers travaux sont également réalisés dans le cadre d'une collaboration avec le LAAS Toulouse et d'un programme de recherche financé par l'ANR.

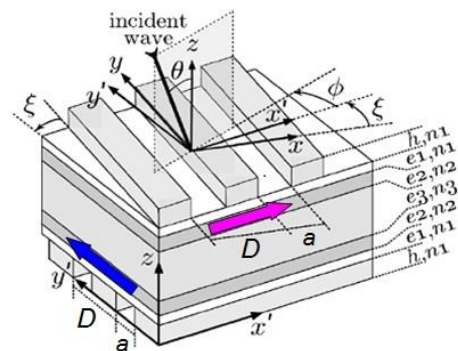


Figure 3.2 : Schéma de réseau GRMG

Fibres optiques micro-structurées

L'institut Fresnel a été parmi les pionniers dans la recherche sur les fibres micro-structurées avec la modélisation et la conception de fibres à cristal photonique ou twistées [*Foundations of Photonic Crystal Fibres*, ISBN 1848167288, 2012]. Ces dernières années, les études ont été concentrées sur les fibres optiques micro-structurées obtenues à partir des verres de chalcogénures qui présentent des avantages pour les applications : indices élevés dans le proche infrarouge (environ 2,5), transparence dans le moyen infrarouge, et forts coefficients non-linéaires (entre 200 fois et 800 fois celui de la silice). Les travaux sont menés en collaboration avec l'ISCR (Rennes) qui, avec la plateforme technologique de Photonics Bretagne, sont leader au niveau international dans la fabrication des fibres micro-structurées en verres de chalcogénure. Les modélisations effectuées à l'Institut Fresnel ont permis de réaliser des premières mondiales dans ce domaine de fibres en verre de chalcogénure : première fibre microstructurée guidante, première fibre microstructurée monomode et première fibre à petit cœur. Les travaux les plus récents ont été concentrés sur les effets non-linéaires.



Figure 3.3 : Préforme (avant étirement) de fibre micro-structurée en verre de chalcogénure (ISCR).

En 2011, une fibre micro-structurée à cœur suspendu a été conçue à l'Institut Fresnel puis fabriquée à l'ISCR : cette fibre permet la génération de quatre cascades Raman à partir d'une source thulium émettant vers 2 micromètres (record tenant toujours en juin 2016) [Duh-1, Sav-1]. En 2013, le profil opto-géométrique d'une fibre optique micro-structurée pleine "tout-solide", en verre de chalcogénure avec des inclusions de bas indice assurant le confinement dans le cœur de la fibre, a été proposé par l'Institut Fresnel puis fabriqué et caractérisé à l'ISCR [Tou-1]. En 2014, une nouvelle solution a été proposée en combinant l'effet bande interdite photonique avec le confinement de type ARROW (pour *Anti-Resonant Reflecting Optical Waveguide*). La fabrication et les caractérisations à l'ISCR ont confirmé le type particulier du guidage généré dans le cœur de ces fibres [Cai-1].

Autres composants optiques conçus

Les connaissances développées à l'Institut Fresnel en modélisation des réseaux de diffractions, cristaux photoniques et métamatériaux sont mises à profit pour concevoir de nouvelles fonctions et composants optiques (longueurs d'onde du visible et des télécommunications optiques à 1.55 μm). Ces travaux sont menés en étroite collaboration avec des équipes du réseau RENATECH (IEF, IEMN) ou l'industriel PSA dans le cadre de programmes financés par l'ANR ou du GDRI Chine-France PHOTONET, pour rassembler l'ensemble de la chaîne de compétences depuis la modélisation en photonique jusqu'à la nano-fabrication, la caractérisation et la valorisation (dépôt de brevets en partenariat avec l'industriel PSA).

Depuis 2011, ces travaux ont permis de proposer de nouvelles solutions en optique pour concevoir des composants avec de nouvelles fonctions (voir figure 3.4). Un nouveau type de circulateurs compacts en optique guidée a été proposé en utilisant une cavité à miroir de Bragg pour exalter l'effet non-réciproque (isolation de l'ordre de 100 sur une largeur spectrale de 0,05%) [Smi-1]. Une technique semi-analytique de conception de réseaux anti-réfléchissants pour les cristaux photoniques a été proposée [Smi-2], et sa performance a été confirmée avec la fabrication (IEMN) et la caractérisation en champ proche (ICB) d'une lentille plate en cristal photonique augmentée de ces réseaux aux interfaces [Hof-1], avec une efficacité mesurée multipliée par un facteur 4.

Enfin, des réseaux de fils d'argents ou de nanoparticules sur substrat de verre ont été proposés pour réaliser des surfaces transparentes avec des propriétés de filtrage [Bru-2]. Une étude paramétrique poussée a permis d'optimiser la transparence de ces surfaces pour réaliser des dispositifs d'affichage compatibles avec les exigences imposées dans le domaine du transport automobile (brevet déposé en partenariat avec l'industriel PSA).

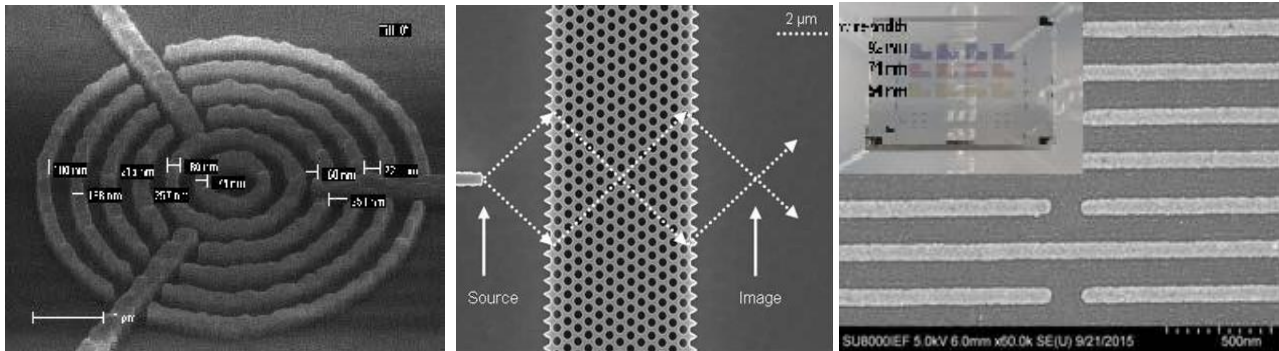


Figure 3.4 : composants modélisés et conçus à l'Institut Fresnel ; à gauche, un composant non-réciproque fabriqué et caractérisé à l'IEF ; au centre, une lentille plate en cristal photonique (avec des réseaux anti-réfléchissants aux interfaces) fabriquée à l'IEMN et caractérisée en champ proche à l'ICB ; à droite un filtre optique avec une propriété de transparence fabriqué et caractérisé à l'IEF pour des applications dans automobile (partenaire industriel PSA).

4. Métamatériaux

L'axe de recherche " métamatériaux " constitue une thématique phare de l'Institut Fresnel. Les résultats obtenus à l'Institut Fresnel ont été de premier plan avec des articles fondateurs sur un indice de réfraction négatif [J. Opt. Soc. Am. A **17**, 1012 (2000)], une antenne plate directive par ultra-réfraction [Phys. Rev. Lett. **89**, 213902 (2002)] et le concept d'invisibilité en optique électromagnétique [Optics Lett. **32**, 1069 (2007)]. Dans cette thématique très compétitive au niveau international, l'originalité de l'Institut Fresnel a été d'étendre les concepts de métamatériaux et de proposer des applications dans les autres domaines des sciences de l'ingénierie : hydrodynamique [Phys. Rev. Lett. **101**, 1345011 (2008)], mécanique [Phys. Rev. Lett. **103**, 024301 (2009)], sismique [Bru-4], et récemment à des processus de diffusion de chaleur [Gue-4, Gue-6] et de masse [Gue-5].

Ces activités de recherche sur les métamatériaux bénéficient de l'ensemble des connaissances développées dans le thème : nouveaux modèles (expérimentation micro-ondes, homogénéisation, dispersion), méthodes numériques et nouveaux effets physiques dans les structures périodiques. Elles participent significativement au rayonnement national et international de l'Institut Fresnel avec des collaborations avec des laboratoires parmi les plus prestigieux dans le domaine (Imperial College London, MIT, Austin university, KIT, CUDOS, IIT Kanpur Inde, Institut Langevin, ICFO...), des financements très sélectifs (ERC, IdEx, ANR...), de nombreuses contributions à la diffusion de la culture scientifique, et des activités de transfert très prometteuses (collaborations avec l'industriel Ménard/Vinci et la startup *multiwave*, transfert technologique avec la SATT-SE).

Métamatériaux en optique et micro-ondes

Les activités de recherche sur les métamatériaux pour les ondes électromagnétiques menées à l'Institut Fresnel sont à la pointe sur la scène internationale avec la démonstration de nombreuses structures d'invisibilité. Un premier tapis d'invisibilité a été conçu pour les ondes de plasmon de surface en optique (à 633 nm), puis réalisé et caractérisé à ICFO Barcelone [Kad-3], et un deuxième tapis d'invisibilité a été proposé en optique intégrée (à 1550 nm), puis fabriqué à l'IEMN Lille et caractérisé à l'ICB Dijon [Sch-1]. Par ailleurs, la cape à vagues conçue à Fresnel en 2008 a été caractérisée avec succès à l'Institut Fresnel pour les micro-ondes [Xu-1] entre 3 et 7 GHz, et au MIT pour les ondes de pression entre 4 et 8 KHz. Ce qu'il convient aujourd'hui d'appeler la cape multi-ondes (vagues, micro-ondes et son) montre la puissance des analogies entre les équations d'onde transformées : la même équation de Helmholtz est valide pour les vagues en régime linéaire et peu profond, pour les ondes transverses magnétiques, et les ondes de pression dans les fluides. Une cape de forme pyramidale a par ailleurs été conçue, réalisée et caractérisée à l'Institut Fresnel [Abd-1].

En complément de ces preuves de concept, des travaux exploratoires ont été menés pour généraliser les transformations et les repliements d'espace aux milieux bi-anisotropes, qui sont solutions d'équations similaires à celles de l'élasticité. La bi-anisotropie présente l'intérêt de produire de la réfraction négative sans matériau d'indice négatif dans des situations judicieusement choisies. Cette propriété a permis de proposer tous les effets spectaculaires qui en découlent : camouflage externe par repliement d'espace [Liu-1], focalisation avec lentilles plate et cylindrique, ainsi que des phénomènes d'exaltation de champ dans des échiquiers [Liu-3].

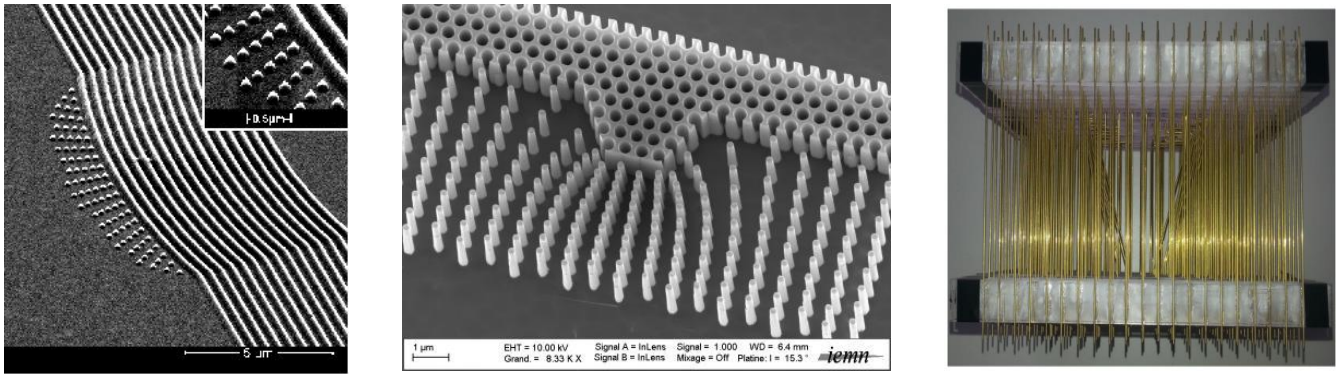


Figure 4.1 : Tapis pour les ondes de plasmon de surface (à gauche : design Institut Fresnel et réalisation et caractérisation ICFO) en optique intégrée (au centre : conception Institut Fresnel, réalisation IEMN et caractérisation ICB), et cape d'invisibilité pour les micro-ondes (à droite : Institut Fresnel).

Métamatériaux en acoustique et mécanique

L'institut Fresnel a joué un rôle important dans le développement des métamatériaux acoustiques et mécaniques, notamment dans le domaine des multi-structures constituées de résonateurs basse fréquence [Big-1, Ach-0]. Ces propriétés des multi-structures ont été utilisées pour obtenir de la focalisation [Big-1] et de la protection [Ach-0]. Ces travaux ont également permis de proposer les premiers designs théoriques de capes d'invisibilité pour les ondes mécaniques [Dia-1]. Une application potentielle de ces multi-structures est la protection des grandes infrastructures contre les ondes mécaniques dans le génie civil (voir le paragraphe suivant 4.3 sur la protection sismique). Des recherches sont également menées sur les ondes de surface sur les plaques, avec par exemple la première proposition théorique d'une cape d'invisibilité pour les ondes de Lamb dans les plaques fines [Dub-2]. Dans le cadre du projet ANR PLATON, ces travaux ont conduit à la démonstration expérimentale de la réfraction négative dans une plaque de duralumin percée de trous. Enfin, les derniers travaux sur les plaques visent à étendre ces résultats à plus grande échelle pour contrôler les ondes de Rayleigh-Lamb avec des forêts de piliers (ou arbres) en collaboration avec le groupe de Philippe Roux (ISTERRE, Grenoble) [Col-1].

Protections hydrodynamique et sismique

Les nouvelles possibilités offertes par les métamatériaux ont été judicieusement mises à profit pour imaginer des applications très prometteuses en hydrodynamique et en sismique. Ces travaux reposent sur les analogies entre les différentes équations d'onde, comme par exemple entre les ondes de plasmon de surface et les ondes Rayleigh en élastodynamique ou les vagues en hydrodynamique. Ces activités de recherche bénéficient d'un financement européen ERC.

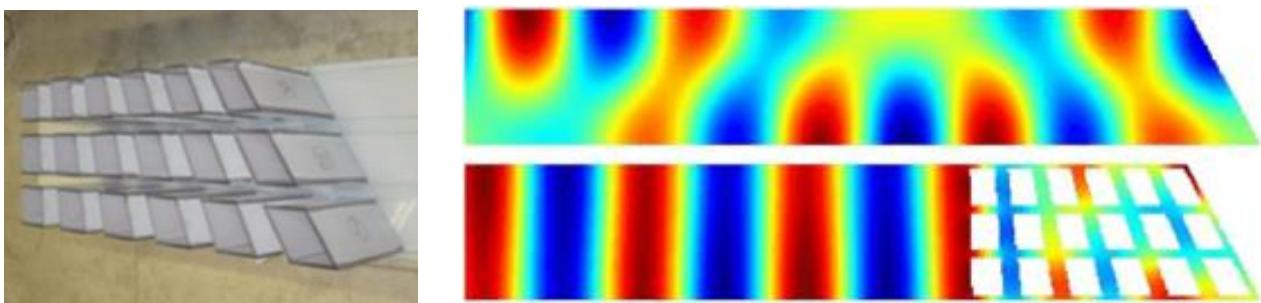


Figure 4.3 : Exemple de structure (échelle métrique) permettant de contrôler les vagues : photo du tapis à gauche, et simulations du champ de vagues réfléchi par le bord biseauté du canal à houle (17 mètres de long) sans le tapis en haut à droite et avec le tapis en bas à droite.

Les derniers travaux en hydrodynamique reposent sur une première série d'études sur des capes d'invisibilité pour les vagues (collaboration avec IRPHE, Marseille) [Dup-2]. Ces connaissances ont été mises en œuvre pour proposer de nouvelles solutions pour la protection contre les vagues océaniques qui pourraient être utilisées pour concevoir de nouvelles générations de digues structurées [Dup-1]. Ces solutions ont fait l'objet de deux brevets, et leur pertinence en terme d'application est étudiée dans un projet de maturation avec la SATT-SE (voir figure 4.3).

En 2009, les chercheurs de l'Institut Fresnel ont proposé de protéger des bâtiments sensibles en utilisant des métamatériaux sismiques, comme montré par l'image artistique (figure 4.4) qui schématise des ondes de Rayleigh détournées par un ensemble de différentes couches concentriques. Un premier prototype de métamatériau sismique a été caractérisé expérimentalement en 2012 en collaboration avec l'industriel Ménard du groupe Vinci (collaborateurs

industriels S. Brûlé et E. Javelaud) [Bru-4]. Ces résultats très prometteurs montrent que le concept de cape sismique pourrait permettre de créer des barrières protectrices contre des effets destructeurs des tremblements de terre. Des solutions avec des colonnes de béton dans le sol, ou bien des piliers rigides sur le sol sont actuellement étudiées, pour notamment contrôler les ondes dans les bassins sédimentaires (en collaboration avec ISTERRE, Grenoble).

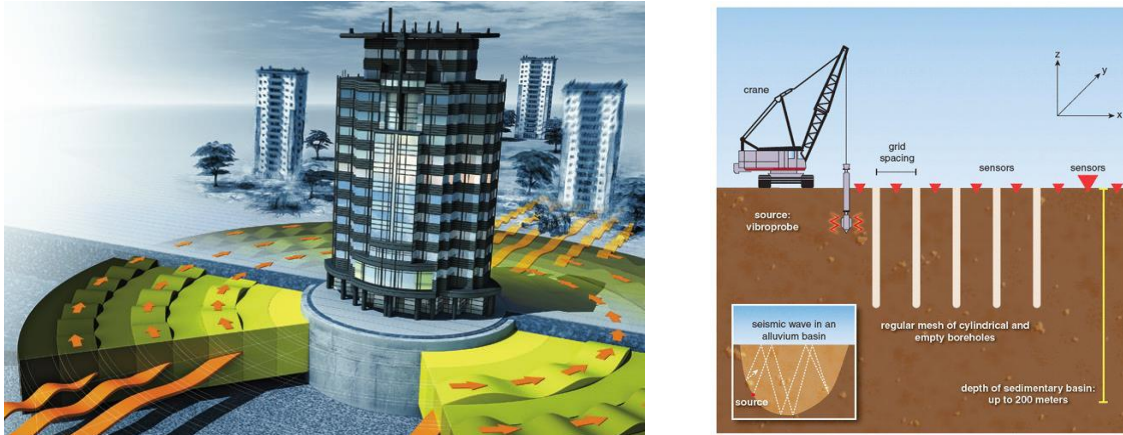


Figure 4.4 : Vue artistique d'une cape sismique (à gauche, infographie Popular Sciences) et dispositif expérimental de la première réalisation de cape sismique (à droite, infographie Ménard).

Chaleur et mimétisme

Les techniques de transformation d'espace ont été récemment [Gue-6] étendues au cas de la chaleur (loi de Fourier). Cette extension s'est tout d'abord appuyée sur une analogie générale [Amr-1] entre l'optique et la thermique (filtrage multicouche, diffraction, microcavités, cape planaire). Les propriétés d'invisibilité (redressement d'isothermes) ont été ensuite étendues au processus de conduction, avec une attention particulière à l'efficacité et la robustesse des composants (méta-matériaux) issus des techniques d'homogénéisation [Pet-1]. L'étape suivante a concerné la résolution (récente) du problème du mimétisme dans le cas le plus général, puis à son application aux problèmes inverses [Far-2]. Il s'agit là de deux avancées notables dans la mesure où les objets à camoufler peuvent désormais être imposés en forme et conductivité. A noter que ces résultats s'appliquent également au domaine des ondes. Ces travaux s'étendent actuellement aux processus de radiation thermique (signatures IR). L'ensemble du projet a bénéficié d'un projet financé par l'Institut Carnot STAR (projet INVISITHERM), du soutien de l'ANR (projet INPACT) avec un consortium associant l'EM2C (transferts thermiques), l'IEMN (micro-technologies) et le LMGC (mathématiques). Une collaboration a démarré sur ce thème en 2015 avec l'UMI CINTRA de Singapour (réalisation de prototypes).

Application des métamatériaux au bio-médical

Suite à la proposition d'une cape biochimique pour le contrôle de la diffusion de drogues [Gue-5] (collaboration avec le CRCM à Marseille), des données expérimentales ont validé l'idée que des feuillets de graphène enrobés d'acides aminés peuvent servir de base à une cape qui non seulement tue des cellules tumorales (expériences in vitro sur l'internalisation d'une nano-particule dans une cellule de cancer du sein pour de la diffusion de drogue) mais aussi réduit considérablement la toxicité de l'oxyde de graphène. Un brevet européen a été déposé en 2016 par Inserm Transfer (avec Aix-Marseille Université/CNRS/INSERM, Kings College London et Imperial College London) et des tests précliniques sont en cours. Ce travail a pour but d'améliorer la thérapie par conjugaison d'anticorps qui est la forme la plus courante de thérapie ciblée, et est sous licence depuis 2003. Ces activités de recherche sont financées par l'initiative d'excellence A*MIDEX (projet BIO-CLOAK).

RAYONNEMENT ET ATTRACTIVITÉ ACADÉMIQUES

1. Prix et distinctions scientifiques

- Daniel Maystre, lauréat 2011 du " **Prix Ampère de l'Electricité de France** ", Grand Prix de l'Académie des Sciences
- Sébastien Guenneau, **lauréat ERC starting grant consolidator** 2011 - 2016
- Evgueni Popov, nommé **membre senior de l'Institut universitaire de France** en 2016
- Vadim Markel, nommé **Outstanding Referee** de l'*American Physical Society* en 2016
- Benjamin Vial, **Prix De Thèse C'nano Paca** 2014 recherche finalisée

- Claudia P. Valdès-Escobar, **prix de l'école doctorale ED352**, 2014
- Ivan Vozniuk, **prix de l'école doctorale ED352**, 2014

2. Attractivité

- **Recrutement** d'un chercheur senior (Vadim Markel, 50% dans le thème), chaire de l'IdEx A*midex
- **2 docteur Honoris Causa** de l'université d'Aix-Marseille : A. Movchan, Liverpool university (2012) et Sir J. Pendry, Imperial College London (2013)
- **5 chercheurs invités** : Professeur Y. Bérubé-Lauzière (3 mois : Shrebrooke, Québec, Canada), A. Rodriguez (Princeton University), Mathieu Francoeur (1 mois : Utah University), Ross McPhedran (3 mois sur la période : CUDOS, Sydney), Richard Craster (1 mois : Imperial College London)

3. Organisation de manifestations scientifiques

- **Organisation de 3 conférences internationales** : ETOPIM 9 (Marseille 2012), NUMELEC (Marseille 2012), OWTNM 2014 (Nice 2014)
- **Participation à l'organisation de 12 conférences internationales** : Takona Photonics (éditions 2011 et 2012), International Symposium on Electric and Magnetic Fields (Bruges 2013), NUMELEC (Saint-Nazaire 2015), ECBO SPIE (éditions 2011 et 2013), WMIC (éditions 2012 et 2013), IEEE-ISBI (2014), LIP (2015), Metamaterials' (éditions 2015 et 2016), ICNP/AOM (Hong-Kong 2012)
- **Organisation de 3 conférences nationales** : workshop INSIS CNRS "Invisibilité et Métamatériaux" (Paris, 2013), workshop INSIS CNRS "Optique Electromagnétique" (Paris, 2015), JNOG (Optique Marseille 2011)
- **Participation à l'organisation de 7 conférences nationales** : Colloque National Métamatériaux (éditions 2011 et 2013), workshop INSIS CNRS "Calcul Intensif" (Paris, 2015), Ecole thématique CNRS "Des Photons et des Neurones" (2012), Ecole d'été "La nanophotonique des structures périodiques : outils théoriques et expérimentaux, de la conception à l'analyse des performances" (Les Houches, 2012), conférences COLOQ-HORIZONS-JCNO-JNOG d'Optique Marseille 2011, workshop du GDR META (Cargèse, 2016)

4. Participation à des expertises

- **Editeurs dans 5 revues internationales** : Physics Letter A, Advances in Mathematical Physics, Proceedings of the Royal Society of London Series A, European Physical Journal : Applied Metamaterials, ISTE Editions (section ondes)
- **Experts dans 10 programmes européens et internationaux** : évaluation de projets ERC (2 par an en moyenne), évaluation de projets Marie Skłodowska-Curie (1 par an en moyenne), FQRNT (Québec), NSERC (Canada), UEFISCDI (Roumanie), RBUCE-UP (Paris-Sud), EPSRC (UK), US-NSF (USA), FNRS (Belgique), Fulbright Foundation (USA), The Leverhulme Trust Foundation (UK)
- **Experts à l'ANR** : un membre du comité d'évaluation "Mathématiques, Informatique, Systèmes et Ingénierie de la communication" (CES 40) de l'ANR, expertise d'environ 10 projets par an
- **Experts dans des programmes nationaux** : OMNT, région Centre, région Aquitaine, région Ile-de-France, région Nord-Pas-de-calais, ANRT
- **Participation à des conseils** : un membre du conseil scientifique d'institut INSIS CNRS (2010-2014), un membre de la commission interdisciplinaire CID 50 du comité national (2012-2014), un membre du conseil scientifique de l'université d'Aix-Marseille (2010-2014), deux membres du conseil de département de Physique de l'université d'Aix-Marseille (2012-), un membre du conseil national de l'enseignement supérieur et de la recherche (CNESER, 2015-)

5. Participation à des réseaux scientifiques

- Membre du réseau européen Photonics4brain
- Membre du réseau COST Action TU1208 Civil Engineering Applications of GPR
- Membre du comité scientifique du GDRI PHOTONET Chine-France
- Membre du comité scientifique du GDR META (métamatériaux acoustiques)
- Responsable d'un groupe de travail du GDR Ondes

6. Projets et collaborations

- **Projets collaboratifs** : 9 projets financés par l'ANR (FANI, CONFIAN, OPTRANS, TRAMEL, PLATON, INPACT, PLANISSIMO, CALITREC, LOUISE), un LIA ALPHA financé par l'IdEx A*midex, partenaire d'un projet financé par l'IdEx A*midex (BIOCLOAK)
- **Collaborations internationales** (environ 20 institutions) : Akron University (USA), Austin University (USA), Cantabria University (Espagne), CNR-ISAC (Bologne, Italie), CUDOS (Sydney, Australie), ICFO (Barcelone), IIT Kanpur (Inde), Imperial College London (UK), Institut de Physique du Solide (Sofia, Bulgarie), Institute of Spectroscopy (Moscou, Russie), KIT (Karlsruhe, Allemagne), Liverpool University (UK), Lomonosov State University (Moscou, Russie), MIT, Pardubice University (République Tchèque), Princeton University, Santander University (Espagne), Shanghai Jiao Tong University (Chine), Xidian University (Xi'an, Chine).
- **Collaborations nationales** (environ 25 laboratoires) : CEA-LETI, CETHIL, CNES, EM2C, FEMTO-ST, ICB, IEF, IEMN, Institut Langevin, INT, IPAG, IPC, IRPHE, ISCR, ISTERRE, L2E, LAAS, LNE, LPhIA, LMA, LMGC, LPN, MAPMO, MIO, PSA Peugeot Citroën, SATIE.

INTERACTION AVEC L'ENVIRONNEMENT SOCIAL, ÉCONOMIQUE ET CULTUREL

1. Partenaires industriels

- **startup Multiwave** pour la modélisation numérique : accord de collaboration scientifique (convention CNRS), contrats réguliers, 9 permanents de l'Institut Fresnel impliqués.
- **industriel Ménard** (groupe Vinci) pour l'expérimentation en sismique : 3 publications communes.
- **CNES** pour les filtres à résonance de mode guidé : 1 projet commun, 3 publications communes, 1 brevet commun (international)
- **PSA Peugeot Citroën** pour des composants optiques pour la vision tête haute : 1 projet ANR commun, 1 publication commune, 1 brevet commun.
- **SATT Sud-Est** pour la protection en hydrodynamique : 1 projet de maturation
- **Richardson Gratings** (Newport, Rochester, USA) et **Thermo Fisher Scientific** (Lausanne, Swiss) pour les applications des réseaux de diffraction
- **ST Microelectronics** pour la microélectronique : 2 thèses CIFRE
- **DIPTA** pour la modélisation de système de protection solaire : 1 thèse CIFRE
- **Lightnics** (Lunel) pour l'imagerie en infra-rouge
- **VEOLIA** pour l'expérimentation micro-ondes : 1 contrat
- **PERFOS** (Plate-forme technologique de Photonics Bretagne) pour la fabrication des fibres micro-structurées : 1 contrat

2. Diffusion de la culture scientifique

- **5 articles de vulgarisation scientifique** sur les métamatériaux et l'invisibilité dans les revues " Pour la science ", " La recherche ", " La revue Photonique " et " Le journal du CNRS "
- **5 conférences grand public** :
 - o conférence invitée au siège du CNRS à Paris le 23/05/2012
 - o soirée Scientifique à l'Université ouverte Lyon 1 le 7/02/2013
 - o *lecture* invitée à la classe de Sciences de l'Académie Royale de Belgique le 12/01/2013
 - o conférence grand public à la cité des sciences de la Villette en octobre 2014
 - o conférence grand public au Musée des Arts et Métiers en février 2016
- **Media de large audience** : nombreuses interventions radiophoniques (France Inter, RFI), télévisées (France 2, M6, BBC) et dans la presse écrite (Le monde, Le Figaro, Le point...)
- **Actions vers le scolaire** : accueil régulier de collégiens et lycéens à l'Institut Fresnel, visites régulières dans les collèges et lycées, animation d'un stand à la fête de la science tous les ans.

3. Liste des contrats

- **startup Multiwave** pour la modélisation numérique : accord de collaboration scientifique (convention CNRS), contrats réguliers depuis 2015, 9 permanents de l'Institut Fresnel impliqués.

- **SATT Sud-Est** pour la protection en hydrodynamique : 1 projet de maturation
- **VEOLIA** pour l'expérimentation micro-ondes : 1 contrat
- **PERFOS** pour la fabrication des fibres micro-structurées : 1 contrat
- **CCRM** pour l'expérimentation micro-ondes : 1 contrat

4. Liste des brevets

- [B1] T. Puvirajesinghe, Z. Lane, R. Craster, S. Guenneau. A 3-dimensional spherical cloak for prolonged delayed diffusion of a therapeutic peptide drug and a small chemical compound used as anti-cancer agents. Antibody structures provide targeted therapy. France, Patent n° : EP16305485.1. 2016.
- [B2] Y. Achaoui, A. Diatta, S. Enoch, S. Guenneau. Structure de guide d'ondes élastiques. France, N° de brevet: 100938FR. 2015.
- [B3] R. Aznavourian, S. Guenneau. Procédé de détermination des valeurs d'un phénomène physique dans un milieu. France, N° de brevet: ICG20441. 2015.
- [B4] A.-L. Fehrembach, B. Dagens, D. Barat, B. Gralak, E. Popov, et al.. Dispositif de vision tête haute avec lame à surface réfléchissante. France, N° de brevet: 1550086. 2015.
- [B5] G. Dupont, S. Enoch, B. Molin, S. Guenneau, O.r Kimmoun. Procédé de conception assistée par ordinateur d'un dispositif pour dévier, par diffraction sur des colonnes, la trajectoire de vagues dans un liquide. France, Patent n° : ICG20451. 2015.
- [B6] A. Monmayrant, O. Gauthier-Lafaye, K. Chan Shin Yu, A.-L. Fehrembach, A. Sentenac, et al.. Filtre optique à réseaux résonnants insensible à la polarisation accordable en fonction de l'angle d'incidence. France, Patent n° : FR 2970088. 2011.
- [B7] S. Enoch, M. Farhat, S. Guenneau, A. Movchan, Structure that can channel an elastic wave propagating in a plate. US, patent n° : PCT/FR2011/052089, 9140326 B2. 2015.
- [B8] G. Dupont, O. Kimmoun, S. Guenneau, B. Molin, S. Enoch. Structure apte à guider les vagues. France, patent n° : ICG20481. 2016

IMPLICATION DU THÈME DANS LA FORMATION PAR LA RECHERCHE

1. Participation à la formation en master et doctorat :

- **Encadrement de 27 doctorants** (dont 17 étrangers) sur la période 2011-2016
- **Modules de formation doctorale** (environ 5) : programme Erasmus mundus Europhotonics et école doctorale ED 352
- **Unités d'enseignement en master** (environ 10) : masters Erasmus mundus Europhotonics et POESII
- **Ecole d'été** " La nanophotonique des structures périodiques : outils théoriques et expérimentaux, de la conception à l'analyse des performances ", Les Houches 2012 (2 semaines, 60 participants)
- **Ecole d'été INNOV-Fibre 2014**
- **Ecole d'automne de Mesures d'Antennes et de Diffraction**
- Université de Princeton (USA) : cours sur les fibres optiques microstructurées à destination des étudiants de master et des doctorants de 1ère et 2nde années (septembre - octobre 2015).
- Université de Xidian (Chine) : cours sur les métamatériaux à destination des doctorants (juin 2015)

2. Responsabilités pédagogiques :

- **Direction des études** d'un département de Polytech Marseille (100 étudiants, années L3-M1-M2, composante de l'université d'Aix-Marseille)

- **Coordinateur des modules de formation doctorale en photonique** sur le site de l'Etoile (St Jérôme et technopôle) de l'université d'Aix-Marseille
- **Support de télé-enseignement** en licence, filière mathématiques / physique (équivalent 60h, 100 étudiants par an).
- **Responsabilité des stages de recherche en L3** du parcours MPC1 de l'Université d'Aix-Marseille

STRATÉGIE ET PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES POUR LE FUTUR CONTRAT

Trois actions prioritaires seront mises en œuvre pour le futur contrat dans le périmètre du thème " Electromagnétisme et métamatériaux ". La première action sera de montrer la pertinence des nouveaux modèles, méthodes et outils d'analyse développés à l'Institut Fresnel, notamment vis-à-vis des enjeux de la photonique et des métamatériaux (nouveaux effets et futures applications). La deuxième action sera d'assurer le renouvellement et la valorisation de la modélisation numérique dans le contexte actuel d'une évolution rapide, notamment depuis l'arrivée des logiciels commerciaux. La troisième action sera de développer des axes de recherches originaux et prometteurs vis-à-vis des applications dans la thématique des métamatériaux pour que l'Institut Fresnel soit toujours à la pointe de ce domaine de recherche.

Ces actions visent à faire de l'Institut Fresnel un des laboratoires de référence sur la scène internationale pour l'élaboration d'outils, de méthodes et de modèles en électromagnétisme classique, et pour la conception de nouveaux composants en optique.

Une force de l'Institut Fresnel est de rassembler de nombreux ingénieurs, chercheurs et enseignants-chercheurs qui élaborent des modèles, méthodes et outils sans équivalent dans la communauté de l'électromagnétisme classique. Ces connaissances seront développées et partagées avec de nombreux partenaires, notamment à l'international, pour augmenter leur diffusion et montrer tous leurs potentiels face aux enjeux majeurs de la photonique et de ses applications.

Les activités d'homogénéisation hautes fréquences bénéficient d'une nouvelle dynamique avec le recrutement en 2015 de Vadim Markel (chaire de l'A*midex) et seront effectuées en collaboration avec Imperial College London (UK) et Akron University (USA) pour développer des modèles rigoureux en régime de résonance ou de Bragg et pour modéliser la dépendance angulaire. Ces nouveaux modèles, immédiatement transférables aux thématiques des métamatériaux et des métasurfaces, seront utilisés pour concevoir des métasurfaces transparentes en collaboration avec le C2N (antérieurement l'IEF), l'industriel PSA et Tsinghua University (Chine), pour des applications dans les dispositifs d'affichage et les vitrages du futur. Les recherches sur la dispersion et les PMLs sont actuellement effectuées en collaboration avec le laboratoire POems (Palaiseau) et le LP2N (Bordeaux) avec l'objectif d'établir des résultats rigoureux sur les QNMs et d'utiliser ces QNMs pour modéliser les nanostructures métalliques. Le potentiel de l'analogie micro-ondes sera développé avec la recherche de nouveaux matériaux équivalents permettant à la fois le contrôle de la géométrie et des caractéristiques diélectriques (notamment la dispersion des métamatériaux, en collaboration avec POems Palaiseau), et aussi mis à profit dans une collaboration internationale en cours (Cantabria University, Espagne) sur l'étude de résonateurs diélectriques, de résonances de Fano, et de milieux de permittivité et perméabilité équivalentes artificielles. Les nouveaux modèles théoriques et numériques des guides non-linéaires seront utilisés pour concevoir des configurations avec l'objectif d'effets non-linéaires plus importants de plusieurs ordres de grandeur (verres de chalcogénure et métamatériaux) : les collaborations existantes (ISCR Rennes et FEMTO-ST) seront renforcées pour les verres de chalcogénure pendant que des collaborations internationales prometteuses sont engagées pour les guides à base de métamatériaux.

De manière générale, l'ensemble des travaux de conception de nouveaux composants optiques (filtres à réseaux, fibres et autres) pourront bénéficier des collaborations et réseaux déjà bien établis, et permettre aussi de valoriser l'ensemble des modèles, méthodes et outils, qu'il soient théoriques, numériques ou expérimentaux : le GDR ONDES (notamment pour l'expérimentation micro-ondes) et le GDRI PHOTONET Chine-France (conception de composants optiques) ; collaborations avec le CNES (filtres à réseau), l'industriel PSA (dispositif d'affichage), l'ISCR (fibres micro-structurées et non-linéaires).

Les activités d'élaboration de méthodes et de programmation numériques sont effectuées dans un contexte qui a profondément évolué avec la généralisation de l'utilisation des logiciels commerciaux (y compris à l'Institut Fresnel)

et l'atteinte d'une certaine phase de maturité des méthodes spécifiques. Dans ce contexte, l'Institut Fresnel a clarifié sa stratégie en consacrant l'essentiel de l'effort de développement numérique sur les méthodes générales, pour assurer le maintien de leur compétitivité face aux codes commerciaux, et en exploitant les méthodes spécifiques pour les applications. En parallèle, des efforts seront menés pour valoriser l'ensemble des activités de modélisation numérique.

L'effort de renouvellement des méthodes numériques répondra à trois enjeux : plus grands volumes, calculs plus proches de la physique, et plus utiles pour les applications. Pour le premier enjeu, la méthode de décomposition de domaine qui a été développée à l'Institut Fresnel ces dernières années constitue déjà un élément de réponse. En complément, des codes numériques développés à l'Institut Fresnel seront adaptés pour fonctionner sur carte graphique (GPU). L'opportunité de réaliser des calculs sur les centres nationaux (CINES) sera également utilisée pour permettre de modéliser les systèmes de plus grand volume. Le deuxième enjeu est d'offrir de nouvelles possibilités de calcul, stratégiques en photonique : la modélisation en temporel de systèmes très résonants avec la méthode DDA, la prise en compte de la dispersion des matériaux (ou des métamatériaux) et le calcul des QNMs (en collaboration avec le LP2N) de façon systématique et robuste. Des progrès en matière de PML pourront également être très utiles pour déterminer en particulier les modes à pertes. Enfin, la méthode intégrale de surface pourra être améliorée en définissant la surface par une équation paramétrique ou en proposant une nouvelle formulation moins singulière (véritable verrou). Le troisième enjeu de développement, qui concerne toutes les méthodes de l'Institut Fresnel, repose sur leurs performances en termes d'efficacité, de robustesse et de précision qui sont reconnues être au meilleur niveau international. Ces performances seront mises à profit pour ajouter une dimension comme le temporel, pour modéliser rigoureusement des systèmes complexes (méthode Monte Carlo), mais aussi dans des algorithmes itératifs pour résoudre des problèmes inverses, modéliser des systèmes comprenant des matériaux non-linéaires. De telles performances peuvent être également exploitées pour réaliser des études paramétriques "intensives", et pour être couplées à des algorithmes d'optimisation où l'Institut Fresnel a déjà une expertise reconnue pour les couches minces optiques. Ces développements numériques seront déterminants pour réaliser des avancées en imagerie et en conception / optimisation de composants optiques.

Le deuxième axe de développement sera de promouvoir ces connaissances et valoriser ces travaux de programmation numérique. La première valorisation est l'utilisation des codes numériques pour concevoir de nouveaux effets, composants et systèmes optiques, et pour modéliser des problèmes concrets comme cela se fait actuellement par exemple pour les filtres à résonance de mode guidé et les fibres optiques micro-structurées. Les enseignants-chercheurs et chercheurs participant aux recherches en modélisation numérique sont répartis dans 7 équipes de l'Institut Fresnel, au plus près des applications en photonique et en micro-ondes, et en imagerie. Ce mouvement d'intégration sera poursuivi au sein du laboratoire, et les collaborations seront développées avec la communauté de la photonique en France (grandes centrales de technologie du réseau RENATECH, LP2N, ISCR, CNES, PSA) et à l'international (KIT, partenaires du GDRI PHOTONET, université de Liège). La deuxième voie qui sera considérée est la mise en œuvre d'interfaces autour des codes numériques suffisamment généraux et robustes, pour pouvoir les diffuser le plus largement possible (diffusion qui pourrait être couplée à des ouvrages et des offres de formation sur les méthodes numériques). Cette démarche a déjà été engagée par V. Markel (le code <https://www.cbica.upenn.edu/vmarkel/CODES/MC.html> sera bientôt hébergé à l'Institut Fresnel) et est en cours de développement pour la méthode intégrale de volume DDA. De plus, un projet de plateforme commune en ligne pour la méthode des éléments finis est proposé pour l'Institut Fresnel, le LP2N (Bordeaux) et le LCFIO (Palaiseau). Par ailleurs, les différentes méthodes numériques développées à l'Institut Fresnel permettent d'atteindre des niveaux de fiabilité très élevés - par confrontation des différentes méthodes - dans des situations qui peuvent être inédites. Il sera alors pertinent de réaliser à l'échelle de l'Institut Fresnel une base d'exemples de modélisation constituant des références (benchmark) et publiés en ligne. Ces exemples de référence pourraient être enrichis par des données expérimentales produites à l'Institut Fresnel. Enfin, les premières démarches de transfert des codes numériques seront poursuivies (déjà un dépôt de brevet sur le morphing appliqué à la modélisation numérique et un accord de collaboration scientifique - convention CNRS - avec la startup multiwave).

La thématique des métamatériaux devra être déclinée de façon spécifique dans les différentes disciplines concernées. En électromagnétisme, si certaines applications proposées (lentille parfaite et "amplification" des ondes évanescentes, invisibilité en optique) n'ont peut-être pas répondu à toutes les attentes, les futurs développements de cette thématique pourront contribuer au renouvellement d'aspects fondamentaux et de méthodes en optique électromagnétique : problèmes relatifs à la causalité, à la dispersion, aux contrastes d'anisotropie très élevés, à la modélisation numérique en temporel, à l'homogénéisation, à l'introduction du gain, développement des techniques et modèles expérimentaux depuis le régime micro-onde et vers les fréquences du visible. En particulier, des technologies dédiées aux métamatériaux seront développées à l'Institut Fresnel pour fabriquer des métamatériaux hyperboliques et des métamatériaux d'indice proche de zéro pour le contrôle de la densité d'états. Plus généralement, l'amélioration de la résolution des lentilles, de l'efficacité et de la sélectivité des antennes, la réduction de la section efficace radar des capes, le contrôle local de la phase, et des fonctionnements sur des bandes de fréquences plus larges correspondent à des demandes régulières utiles aux applications. Ces recherches seront effectuées à la faveur

de collaborations internationales avec des partenaires prestigieux : MIT (USA), Austin University (USA), KIT (Karlsruhe), IIT Kanpur (Inde), Xidian University et Tsinghua University (Chine), Imperial College London (UK), CUDOS (Australie).

En acoustique, hydrodynamique et sismique, où les verrous technologiques sont moins présents qu'en électromagnétisme, les enjeux se situent notamment dans les applications avec l'amélioration de l'acoustique de salles de spectacle, des digues de nouvelle génération, des chapes de protection sismique avec des trous dans le sol, des colonnes de béton et même des forêts d'arbres. Sur le plan théorique, les modèles considérés doivent être affinés avec des tenseurs d'élasticité non symétriques dans les équations de Navier (pour les ondes de pression et cisaillement) et le caractère viscoélastique des sols pour la sismique, des modèles non-linéaires en hydrodynamique, et des modèles plus réalistes que les conditions de type Dirichlet ou Neumann pour les métamatériaux acoustiques. Dans ces domaines différents de l'électromagnétisme, il sera essentiel pour mener des recherches pertinentes de renforcer les collaborations existantes avec des spécialistes de ces domaines : FEMTO-ST, Institut Langevin, IRPHE, ISTERRE, KIT et l'industriel Ménard (groupe Vinci).

Pour les processus de diffusion, les phénomènes de mimétisme inverse sont désormais bien maîtrisés et doivent maintenant permettre d'y associer les aspects de radiation thermique, majeurs pour aborder la problématique du camouflage par émissivité. L'effort devra également être mis sur les techniques d'homogénéisation " canoniques ", de façon à promouvoir les applications et la valorisation. Dans ce but les collaborations avec l'EM2C et l'IEMN, le LMGC et CINTRA/Singapour, seront renforcées. Enfin, l'effort accompagnant l'émergence des applications des métamatériaux pour des processus de diffusion de médicaments dans le domaine médical sera maintenu, notamment en renforçant les collaborations existantes avec le CRCM et l'IPC.

Liste des ingénieurs, chercheurs et enseignants-chercheurs

Redha ABDEDDAIM, Claude AMRA, Nicolas BONOD, Anabela DASILVA, Guillaume DEMESY, Carole DEUMIE-RAVIOL, Stefan ENOCH, Christelle EYRAUD, Anne-Laure FEHREMBACH, Jean-Michel GEFFRIN, Gaëlle GEORGES, Boris GRALAK, Sébastien GUENNEAU, Amélie LITMAN, Vadim MARKEL, André NICOLET, Evgueni POPOV, Gilles RENVERSEZ, Pierre SABOUROUX, Gabriel SORIANO, Brian STOUT, Gérard TAYEB, Hervé TORTEL, Myriam ZERRAD, Frédéric ZOLLA

THEME 2 - NANOPHOTONIQUE ET COUCHES MINCES OPTIQUES

Coordonnateurs : Julien Lumeau et Jérôme Wenger

RÉALISATIONS

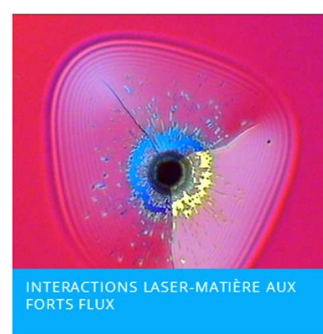
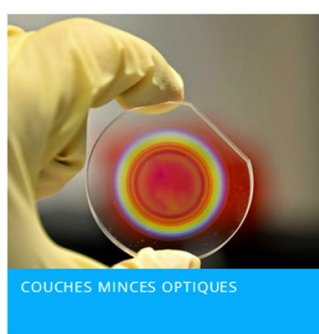
Le développement de composants pour manipuler les ondes électromagnétiques et contrôler la lumière est un élément majeur de l'optique. Au-delà des composants classiques tels que lentilles et miroirs, les nouvelles méthodes de fabrication offrent des technologies innovantes pour réaliser des fonctions inédites telles que des filtres optiques microstructurés ou des antennes résonantes pour confiner la lumière dans des dimensions nettement sub-longueur d'onde. Les activités autour de l'axe thématique " Nanophotonique et couches minces optiques " s'articulent autour de 4 sous-thèmes principaux :

- Interactions lumière-matière aux échelles nanométriques
- Thermoplasmonique et nano-résonateurs optiques
- 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.

Au total, cet axe hautement pluridisciplinaire et inter-équipes fédère plus de 29 chercheurs, enseignants-chercheurs et ingénieurs de recherche. Sur la période 2011-2016, il a généré plus de 150 publications dans des revues internationales à comité de lecture. Le financement est assuré par 60 contrats d'agences publiques (total 5 M€) et 60 autres contrats issus de financeurs privés (total 1 M€).

Ce thème possède naturellement de forts liens avec le thème **Electromagnétisme et Métamatériaux**, où la matière est également structurée pour contrôler les ondes. Nous avons fait le choix de regrouper dans ce thème les nanostructures individuelles (" nanophotonique ") et les empilements planaires (" couches minces optiques "), tandis que les recherches autour de structures bidimensionnelles (réseaux de diffraction et cristaux photoniques) trouvent naturellement leur place auprès des métamatériaux. Par ailleurs, des liens importants sont tissés avec le thème **Imagerie avancée et vivant**, notamment autour des applications des structures nanophotoniques pour les biocapteurs et le contrôle de la température aux échelles nano et micro. Enfin, les liens avec le thème **Traitement de l'information et ondes aléatoires** s'articulent autour des thématiques de la polarisation, de la cohérence optique et de la métrologie de la diffusion lumineuse.



PRODUCTION SCIENTIFIQUE

1. Interactions lumière-matière aux échelles nanométriques

Ce sous-thème traite des propriétés fondamentales des interactions entre un émetteur (atome isolé, molécule unique, nanocristal) et le rayonnement électromagnétique (en champ proche comme en champ lointain), en se concentrant sur les nouveaux phénomènes qui apparaissent aux échelles nanométriques. Les approches couvrent l'interface entre l'optique quantique et l'électromagnétisme classique, et combinent théories analytiques, simulations numériques et

expériences. Parmi les points forts, nous avons obtenu des résultats au meilleur niveau de la compétition internationale dans l'exaltation des propriétés d'émission de molécules fluorescentes et dans le contrôle de leur directivité.

Aspects fondamentaux de la mécanique quantique

Un axe de recherche en optique quantique a été introduit à l'Institut Fresnel pour développer des connaissances sur l'interaction entre la lumière et la matière à l'échelle atomique. Ces travaux s'appuient sur une approche d'électrodynamique quantique décrivant la fonction d'onde du photon en interaction avec la matière. Cette approche a été utilisée pour caractériser la causalité spatio-temporelle lors du rayonnement dipolaire [Dur-6, Deb-1], et pour décrire l'intrication entre champ interne et champ sortant d'une cavité à pertes [Deb-1]. Ces nouvelles connaissances en optique quantique permettent de progresser dans la compréhension des phénomènes d'absorption et d'émission de photons aux temps courts (régime de Zénon [Dur-9]). Par ailleurs l'approche de fonction d'onde du photon apporte un éclairage entièrement nouveau sur les liens entre classique (Maxwell) et quantique et en particulier la transition classique-quantique et l'intrication classique [San-1, Dur-6]. Au cours de ce quadriennal, nous nous sommes également intéressés à la cryptographie quantique en utilisant la théorie de l'information quantique qui permet de résoudre des problèmes non résolus classiquement, plus particulièrement au générateur de nombres aléatoires quantiques [Dur-1, Dur-5], à l'encodage quantique [Dur-4] et au clonage quantique [Dur-5]. Des activités de recherche ont également été menées pour tester les fondements de la mécanique quantique (avec l'opérateur temps [Cham-1, Cou-1, Dur-2, Dur-3], ou les limites du principe de superposition quantique [Col-1, Col-2]). En particulier l'article [Dur-10] établit un pont entre la double solution de de Broglie, la non-linéarité quantique et les "marcheurs" en hydrodynamique (bouncing oil droplets).

Emission exaltée par des nanoantennes

Le signal émis par une molécule individuelle est au mieux de quelques picowatts repartis dans toutes les directions de l'espace. Ce niveau très faible d'intensité restreint fortement la sensibilité des systèmes de spectroscopie couramment utilisés en recherche biologique et en diagnostic médical. Pour améliorer le signal émis par une molécule individuelle, l'émetteur peut être couplé à une nano-antenne plasmonique formée de nanoparticules d'or [Bus-1, Bid-1]. La nano-antenne permet de renforcer localement l'intensité optique d'excitation tout en augmentant le taux d'émission radiative [Berm-1]. L'émission spontanée d'une molécule fluorescente peut ainsi être exaltée de deux ordres de grandeur [Bus-2, Bus-3]. Ces résultats ouvrent des perspectives prometteuses pour suivre des réactions à l'échelle de molécules individuelles dans des solutions fortement concentrées [Pun-2, Pun-3]. Parmi les résultats principaux, nous avons mis au point un nouveau dispositif permettant l'amélioration de la luminosité de fluorescence 1100 fois avec des volumes de détection jusqu'à 58 zeptolitres ($1 \text{ zL} = 10^{-21} \text{ L}$), soit le plus petit volume d'observation au monde [Pun-1]. Ces démonstrations forment une étape importante pour le développement de nouvelles méthodes d'analyse biochimique, les nanosources de lumière et le traitement de l'information quantique [Wen-1, Wen-2, Aou-4]. Nous avons également développé une approche originale permettant le contrôle nano-optique du transfert d'énergie (FRET) aux échelles nanométriques, réalisant la première démonstration mondiale de ce phénomène avec des nanoantennes et des molécules uniques [Ghe-1, Ghe-2, Bid-2].

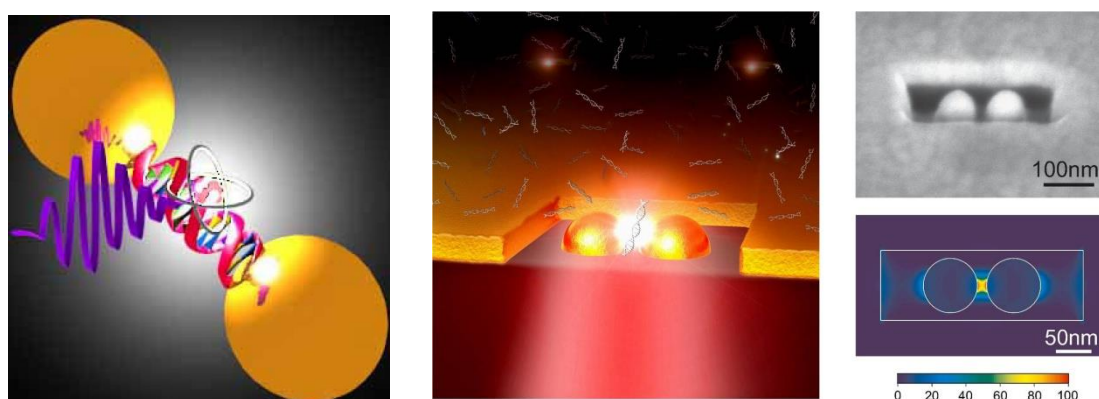


Figure 2 : Nano-antenne formée de deux nanoparticules d'or liées par un double-brin d'ADN [Bus-2] (gauche) et antenne optique dans une nano-boîte pour l'analyse de biomolécules individuelles dans des solutions de fortes concentrations [Pun-1] (droite).

Contrôle nano-optique de la directivité d'émission

Un autre défi technique porte sur le contrôle de la lumière émise par la molécule qui est en général omnidirectionnelle. Nous démontrons que des antennes formées d'une ouverture percée dans un film d'or entourée de

corrugations en sillons circulaires permettent d'améliorer la directivité [Aou-1, Aou-2]. L'antenne transforme une molécule en une source de lumière intense et uni-directionnelle : l'intensité de fluorescence est augmentée de 120 fois, et quasiment toute la lumière est émise dans un cône étroit. L'intensité lumineuse et la direction d'émission sont contrôlées simultanément à l'échelle d'une molécule unique, ce qui constitue une première mondiale. D'autres designs d'antennes ont été proposés et caractérisés, permettant un contrôle poussé de la directivité à l'échelle moléculaire [Aou-3, Lan-1]. Des modèles analytiques, basés sur la théorie multipolaire, ont été élaborés pour décrire l'expression des diagrammes de rayonnement d'un émetteur dipolaire couplé à une particule résonante. Ce modèle a mis en évidence le contrôle de la direction principale d'émission selon la distance entre l'émetteur et l'antenne [Rol-4]. Ce modèle théorique a ensuite été appliqué à la situation plus riche d'un résonateur de Mie diélectrique présentant des modes dipolaires électriques et magnétiques [Rol-5]. Cette étude a notamment permis de montrer expérimentalement que le gain en directivité des antennes pouvait être considérablement augmenté en couplant le mode électrique au mode magnétique [Rol-6].

2. Thermoplasmonique et nano-résonateurs optiques

Alors que le sous-thème précédent se concentrait sur les propriétés d'émetteurs aux échelles nanométriques, le sous-thème " thermoplasmonique et nano-résonateurs optiques " s'intéresse aux propriétés intrinsèques des nanostructures optiques pour absorber et diffuser les ondes lumineuses. Ceci permet à l'Institut Fresnel de couvrir tout le spectre d'applications et de recherches autour des dispositifs optiques individuels sub-longueur d'onde. Parmi les points forts de l'Institut sur cette thématique, nous disposons d'une forte expertise reconnue internationalement dans le contrôle de la température aux nano-échelles ainsi que dans les propriétés de nanostructures optiques résonantes sur silicium.

Absorption de lumière et thermoplasmonique

Depuis 2012, nous développons une technique originale d'imagerie thermique (appelée TIQSI) qui a permis de mesurer pour la première fois la température de nanoparticules d'or sous illumination, sans sonde locale de température. Depuis, grâce à cette technique, nous avons pu étudier de nombreux problèmes à l'interface entre optique, thermodynamique et plasmonique. En particulier, nous avons levé le voile sur la physique de l'ébullition [Baf-4, Met-1] aux petites échelles générée par des nanoparticules d'or et montré qu'elle se produisait contre toute attente à 220 °C, ouvrant de nouvelles perspectives en chimie de synthèse. Nous avons étudié la physique de la génération de chaleur de réseaux de nanoparticules d'or pour mettre en évidence des effets collectifs souvent ignorés dans la littérature [San-2, Baf-3]. Nous avons finalement développé une méthode pour générer n'importe quel profil de température aux petites échelles (uniforme, linéaire parabolique, etc...) à l'aide de réseaux complexes de nanoparticules d'or [Baf-6]. En parallèle à ces études expérimentales, nous avons également mené des travaux purement théoriques pour étudier la génération de chaleur de nanoparticules sous illumination pulsée et harmonique [Baf-1, Bert-1], pour quantifier l'efficacité de matériaux plasmoniques [Lal-1], et pour comprendre la physique de la convection de fluide thermo-induite aux petites échelles en plasmonique [Don-1]. Ces travaux s'inscrivent dans une thématique en plein essor aujourd'hui, la thermoplasmonique [Baf-2], dont les applications portent entre autres sur la thérapie photothermale du cancer, l'enregistrement magnétique de données à haute densité, la nanochimie [Baf-5] ou le thermophotovoltaïque.

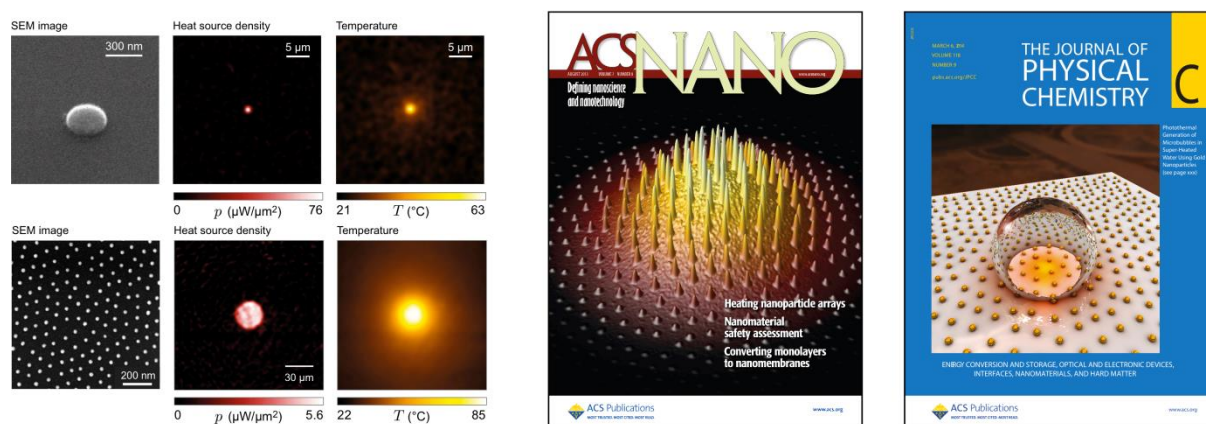


Figure 3 : Elévation de température au voisinage de nanoparticules d'or éclairées par laser. La distribution de température peut être contrôlée localement [Baf-3] (image au milieu) et peut induire la génération de microbulles [Baf-4] (droite).

Théories multipolaires et modales

La théorie multipolaire (ou théorie de Mie) repose sur une décomposition du champ électromagnétique en harmoniques sphériques. Cette décomposition a été utilisée pour étudier le couplage entre particules sphériques [Sto-

1], et les modes de propagation dans des guides constitués de chaînes de nanoparticules métalliques [Rol 2]. Cela nous a également permis d'expliciter les effets de phase entre des particules couplées en champ proche sur la diffusion en champ lointain [Rol-3]. Un développement jusqu'à l'ordre quadrupolaire a été réalisé pour établir des formules analytiques des polarisabilités de résonateurs présentant des modes électriques et magnétiques [Var-1, Rol-2]. Ces résonateurs magnéto-diélectriques ouvrent de nouvelles pistes de recherche pour concevoir des cavités lumineuses, et une approche originale a été suivie afin de quantifier le volume associé à chaque mode [Zam-1]. En complément de l'approche multipolaire, nous avons étendu des méthodes d'analyse modale à la modélisation de dispositifs optiques constitués de particules. La factorisation de Weierstrass a notamment été introduite comme outil innovant pour écrire simplement les réponses optiques de composants en fonctions de leurs pôles et de leurs zéros [Gri-1]. La pertinence de ce modèle a d'abord été établie pour des nanoparticules métalliques, puis la performance de cette méthode a profité aux réseaux de diffraction avec l'analyse des anomalies de Fano dans des structures plasmoniques périodiques planaires [Gri-2]. Plus récemment, cette décomposition a été utilisée pour établir analytiquement les conditions d'absorption idéale de la lumière par des particules diélectriques ou métalliques [Gri-3].

Nanophotonique sur particules diélectriques

Les nanoparticules de silicium ont des propriétés optiques comparables aux nanoparticules d'or [Bon-1, Dev-1]. Elles présentent des résonances électromagnétiques permettant de renforcer les champs proches électriques ou magnétiques [Rol-1, Bou-1]. Nous avons développé deux techniques de fabrication originales, l'une basée sur une stratégie bottom-up en structurant sur de grandes échelles des films minces de silicium par démouillage du silicium [Abb-1, Naf-1], l'autre suivant une stratégie top-down en structurant des masques par lithographie électronique mais en remplaçant l'étape de RIE par une gravure alcaline [Pro-1]. Ces procédés nous permettent de concevoir, réaliser et caractériser des dispositifs pour la nanophotonique résonante sur silicium avec des domaines d'applications variés. Par exemple, nous avons conçu des revêtements antireflets large bande basés sur des réseaux de nano-piliers en silicium [Pro-2]. Nous avons également démontré que des nanoantennes optiques utilisant des résonances électriques et magnétiques dans des nanoparticules de silicium permettent la conception de nouvelles cavités photoniques pour l'exaltation de facteurs de Purcell [Rol-1, Zam-1, Col-3] et le contrôle de la chiralité d'émission [Zam-2]. En parallèle à ces travaux, nous avons également étudié l'intérêt de nanostructurations pour augmenter l'efficacité de cellules solaires. En particulier, nous avons montré l'intérêt de nanostructurations planaires pour fabriquer des cellules organiques semi-transparentes qui atteignent une efficacité équivalente à 90% d'un système opaque, tout en garantissant une transparence supérieure à 20% [Pas-2].

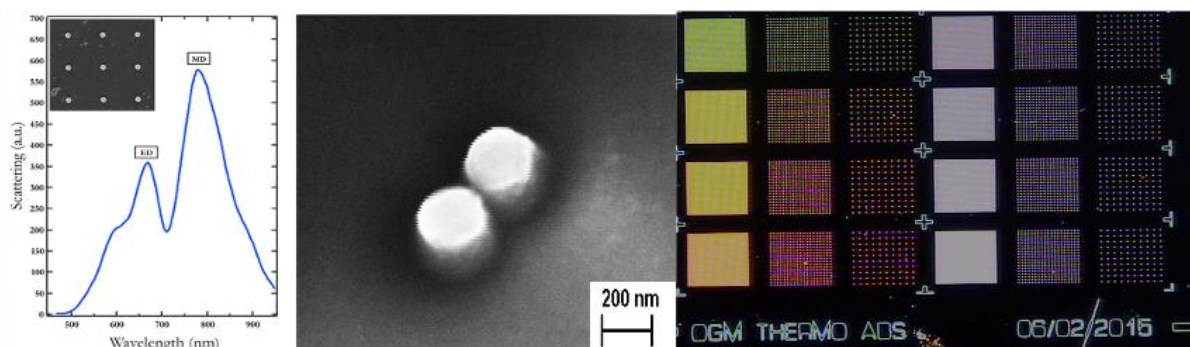


Figure 4 : Spectre de diffusion d'une nanoparticule de silicium (gauche). Dimère de particules de silicium (milieu). Réseaux de particules de silicium. La coloration est contrôlée par la taille des particules (droite)

3. Couches minces optiques

Les filtres optiques interférentiels interviennent dans de nombreux domaines des sciences et de l'industrie. La complexité des fonctions de filtrage a considérablement crû ces dernières années (respect de contraintes simultanées sur l'intensité et la phase, sur la sensibilité à la polarisation, sur le caractère achromatique ou résonnant du filtre, sur sa stabilité à l'incidence...) ce qui a induit quantité d'innovations dans de nombreux domaines, dont notamment ceux de la synthèse des empilements, des technologies de dépôt et de contrôle ainsi que celui de la métrologie ultime des composants fabriqués. Le développement de fonctions de filtrage optique complexes ou innovantes, ainsi que le développement des moyens de caractérisation associés nécessitent la réalisation d'un ensemble d'actions qui constituent l'un des cœurs de métier de l'Institut FRESNEL.

Filtres optiques interférentiels à hautes performances

Une des spécificités de l'Institut Fresnel est la réalisation de composants à très hautes performances. Ces développements bénéficient d'une plateforme technologique dédiée : l'Espace Photonique. Le développement de ce

type de composants nécessite dans un premier temps la mise au point de méthodes robustes et performantes de détermination, à partir de mesures spectrophotométriques, des caractéristiques opto-géométriques des matériaux en couches minces susceptibles d'intervenir dans la constitution des empilements. Celle-ci est rendue possible par la mise au point de méthodes d'optimisation et le développement de programmes dédiés qui peuvent être mis en œuvre non seulement sur des couches uniques, mais également sur des empilements complexes [Gao-1, Gao-2, Gao-3, Gao-4, Pio-1].

La deuxième étape lors de la réalisation d'un filtre à base de couches minces optiques est l'étape de synthèse (ou de design), qui consiste à déterminer la séquence de couches (matériaux et épaisseurs) qui vont permettre de réaliser la fonction de filtrage souhaitée. Celle-ci fait appel à des solutions, soit analytiques, soit purement numériques [Lem-1, Lem-3]. Des travaux théoriques et expérimentaux ont également été menés sur les conséquences de la présence de contraintes mécaniques dans les couches minces optiques et sur les déformations des substrats que celles-ci sont susceptibles d'induire. Ces travaux ont permis d'identifier des méthodes génériques de compensation qui ont conduit à la réalisation de composants complexes de grande planéité [Lem-2]. Il est ainsi possible de contrôler la déformation résiduelle de la planéité après dépôt avec des précisions de l'ordre de quelques nanomètres.

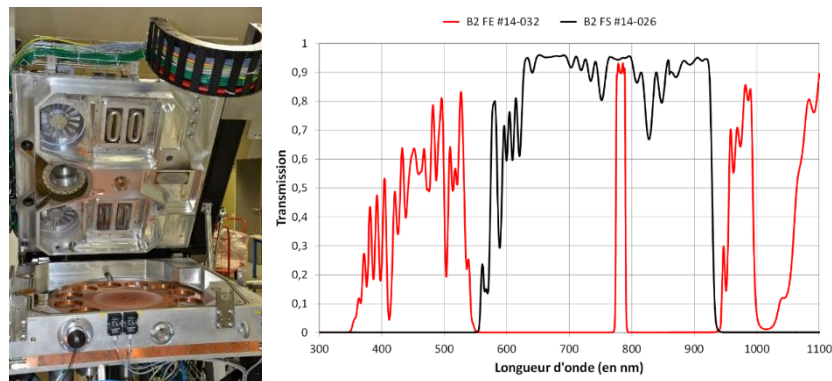


Figure 5 : Machine de dépôt par pulvérisation cathodique magnétron LEYBOLD Optics HELIOS (gauche) et exemple de la réponse spectrale d'un filtre optique complexe constitué par environ 200 couches déposées sur 2 faces (FE et FS) (droite).

Une autre propriété importante des empilements de couches minces optiques concerne leur tenue au flux (lasers impulsifs de forte puissance crête). Des études paramétriques de la tenue au flux de différents matériaux en couches minces ont été réalisées et ont conduit au développement d'un modèle prédictif de la tenue au flux d'un empilement. Il a ainsi été possible de concevoir des empilements à large bande spectrale, faible GDD, haute réflectivité et haute tenue au flux pour des applications sub-15fs [Com-1, Dou-1, Fu-1, Gal-1, Gal-2, Man-1, Man-2, Mel-1, Men-1, Men-2, Wag-1]. De même, des études ont ainsi permis d'optimiser la structure de réseaux de diffraction pour l'étirement et la compression d'impulsions ultracourtes afin d'améliorer leur tenue au flux [Hoc-1, Nea-1, Bon-2, Bon-3]. La combinaison à la fois de la maîtrise des contraintes dans les dépôts et l'optimisation des tenues au flux laser a permis par exemple de développer des miroirs hautes performances qui seront très prochainement intégrés dans la chaîne laser du projet ELI-NP (collaboration avec ALSYOM et le CNRS-LAL).

En se basant sur les méthodes de design développées en interne, il est désormais possible de réaliser des composants de très grande complexité comme par exemple des filtres passe bande à performances ultimes. Ces composants sont réalisés à l'aide de la machine Bühler HELIOS et présentent un très grand nombre de couches (plus d'une centaine par face) et une épaisseur totale pouvant excéder 25 microns. Ils satisfont les exigences de certaines applications spatiales (profil rectangulaire et réjection large bande), tout en présentant des désaccords théorie/expérience n'excédant pas quelques pourcents. Un grand nombre de filtres respectant de tels critères ont ainsi été réalisés (projets TARANIS, 3MI, IDEFIX...) en collaboration avec des industriels comme CILAS ou SODERN [Lem-3].

Le dépôt de ces empilements complexes nécessite une gestion extrêmement précise (typiquement sub-nanométrique) des épaisseurs de chacune des couches. Celle-ci ne peut être obtenue qu'au travers de la mesure in situ de l'évolution de leurs propriétés optiques en cours de dépôt. Des appareillages spécifiques ont donc été développés, et ce pour atteindre, in situ, des précisions de mesure au moins égales à celles que permettent d'atteindre, ex situ, les meilleurs spectrophotomètres du commerce. De nouvelles méthodes de traitement de signaux spectralement et temporellement résolus ont ainsi permis d'extraire de manière nouvelle et sans modèles de dispersion, les dépendances spectrales des parties réelles et imaginaires de l'indice de réfraction des couches fabriquées. Ces travaux sont réalisés dans le cadre du LABTOP (LABoratoire commun de Traitement OPTique des surfaces avec la société CILAS).

Composants et concepts innovants

Au-delà de ces structures qui visent à réaliser des fonctions de filtrage passe-bande en réflexion ou en transmission sur substrats massifs ou sur fibres [Bit-1], de nouveaux concepts ont été introduits et étudiés. Un premier exemple

concerne la définition de structures diélectriques multicouches capables d'optimiser (plusieurs décades) les exaltations géantes du champ électromagnétique en régime de réflexion totale. Ces composants offrent une alternative notable aux composants plasmoniques, notamment parce que l'exaltation est uniquement bornée par les conditions d'éclairement [Ndi-1, Ndi-2, Ler-5]. On note également que le lieu des résonances peut être fixé arbitrairement, et que le substrat peut être remplacé par un sous-empilement. Diverses applications sont d'ores et déjà envisagées, telles que la réalisation de capteurs chimiques ou biologiques (collaboration IMMM), ou l'optimisation du pompage de sources intégrées.

Le deuxième concept est celui de filtres pixélisés, c'est-à-dire de filtres dont les dimensions transverses sont adaptées à celles des pixels d'une matrice CCD pour la réalisation de caméras multispectrales particulièrement compactes (applications spatiales) [Duc-1]. Cette approche vise à généraliser à des fonctions de filtrage quelconques le concept mis en œuvre dans une caméra couleur, en remplaçant les absorbeurs colorés par des filtres optiques interférentiels présentant des spécifications spectrales dépendant de l'application visée. Dans le cadre de ces travaux (R&T CNES), un prototype de filtres à 2×2 micropixels répétés massivement sur une matrice de 100×100 macropixels a ainsi été réalisé. Chaque filtre présente une surface de 30×30 microns et une réponse spectrale locale comparable à la réponse théorique.

De nouveaux développements ont par ailleurs permis la combinaison de matériaux photosensibles et de composants en couches minces pour la réalisation d'éléments optiques de volume à profil d'indice spatialement contrôlé [Lum-1]. Il a ainsi été montré que des couches à base de verres de chalcogénures ($\text{Ge}_{33}\text{As}_{12}\text{Se}_{55}$) homogènes, uniformes et à très faibles pertes pouvaient être produites et qu'il était alors possible de photo-induire des variations locales de l'indice de réfraction excédant 4×10^{-2} . Ces couches ont alors été utilisées pour le contrôle des propriétés spectrales de filtres optiques interférentiels ou bien pour la réalisation d'éléments optiques diffractifs de volume [Joe-1, Joe-2, Joe-3].

Enfin, des travaux innovants ont été menés sur l'apport de matériaux à indice négatif à la réalisation de fonctions de filtrage. On a ainsi pu montrer qu'il était possible de concevoir, grâce à ces métamatériaux, un Fabry-Perot "blanc", c'est-à-dire une cavité planaire multicouche qui présente un comportement résonnant sur une large plage de longueurs d'onde [Leq-1].

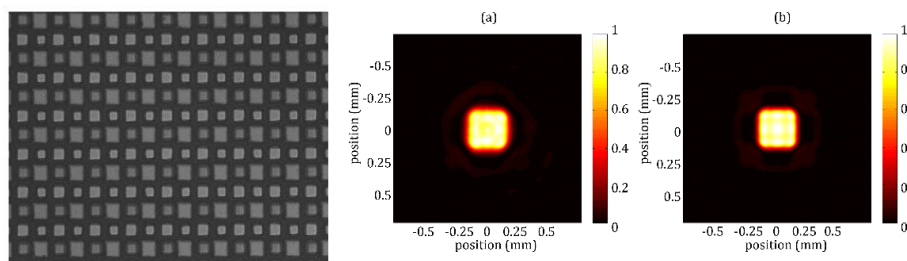


Figure 6 : Image par microscopie d'une matrice de filtres pixélisés (gauche) et diffraction en champ lointain d'un faisceau Gaussien par un élément diffractif optique de volume multi-niveaux (droite) - a : profil expérimental et b : profil théorique.

Métrologie extrême et diffusion lumineuse, nouveaux instruments et procédés

Les progrès considérables réalisés ces dernières années dans le domaine des technologies de dépôt de couches minces optiques ont eu également des conséquences notables sur la métrologie associée. Les performances attendues et obtenues sur les composants sont en effet telles qu'elles sont en générales supérieures de plusieurs décades aux capacités de mesure des meilleurs appareils commerciaux. Dans ce contexte, l'une des activités phares du laboratoire est le développement d'instruments dédiés à la métrologie fine des composants optiques de pointe. En terme de métrologie des propriétés optiques, de nouvelles exigences se sont ainsi faites jour, la première liée à la nécessité de quantifier la dépendance spatiale des propriétés optiques d'un composant sur l'ensemble de sa surface utile (on parlera alors de mesures d'uniformité) et la seconde au contrôle de nouveaux composants caractérisés par une forte structuration spatiale, tels que les filtres linéairement variables, les filtres allumettes ou les filtres pixélisés (on parlera alors de cartographie spatiale). Différents bancs ont été ainsi développés pour parvenir à réaliser une mesure localisée des coefficients de réflexion et transmission, parmi lesquels on citera notamment le banc SPHERE, qui permet de réaliser la mesure des propriétés spectrales de filtres pixélisés avec une résolution spatiale de 2 μm et une résolution spectrale de 0,5 nm en éclairage quasi collimaté (ouverture inférieure à F/10).

Une limitation forte de la mesure des coefficients spéculaires résidait dans la capacité à mesurer des niveaux de transmission inférieurs à 10^{-6} sur des gammes spectrales plus larges que quelques nanomètres ou présentant des pentes supérieures à quelques décades par nanomètre. L'instrument SALSA est le premier instrument à répondre à cette problématique. Il permet désormais de réaliser des mesures de coefficients de transmission pouvant atteindre 10^{-12} sur l'intégralité de la bande CCD (400 nm-1000 nm) avec une résolution de 0,1 nm [Leq-2, Liu-1]. On notera que cette réalisation est considérée comme une première mondiale en termes de métrologie optique et a confirmé le positionnement de l'Institut Fresnel parmi les leaders internationaux du domaine.

Un autre domaine d'importance concerne la diffusion lumineuse. Nos efforts ont tout d'abord porté sur le développement d'une nouvelle génération d'instruments dont les performances sont sans commune mesure avec les précédentes. Ces instruments sont désormais entièrement fibrés, appuyés sur des concepts innovants (réciprocité, télé-centrisme, illumination structurée), et font appel à des sources et détecteurs modernes (laser blanc, fibre micro-structurée, CCD faible bruit). Parmi ceux-ci, on citera notamment l'instrument SALSA dont les performances spéculaires sont étendues à la métrologie de la lumière diffuse. L'ensemble de l'instrumentation a été rassemblé au sein d'une plateforme DIFFUSIF qui nous engage, pour des années, auprès de grands industriels, avec notamment le CNES pour donneur d'ordre et principal financeur [Van-1, Zer-1, Zer-2, Zer3].

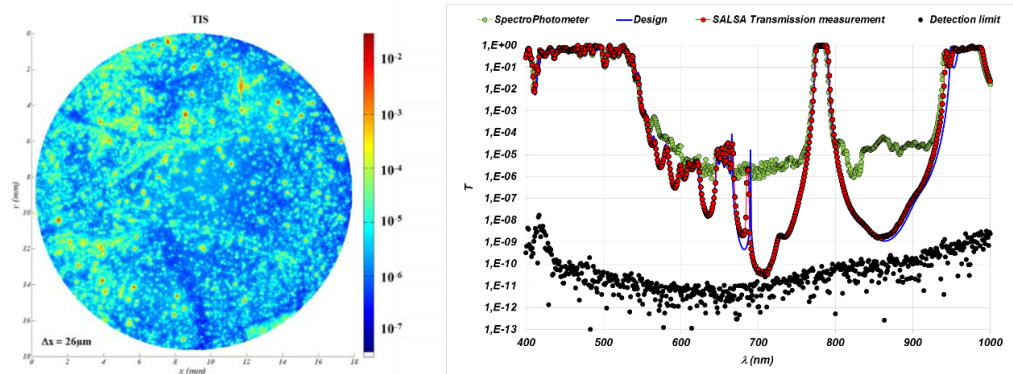


Figure 7 : Cartographie de la diffusion totale intégrée mesurée par l'enregistrement spatialement résolu d'un million de BRDF en parallèle (gauche) et mesure avec l'instrument SALSA du coefficient de transmission d'un filtre passe-bande présentant des réjections pouvant atteindre des densités optiques de 12. Comparaison de la transmission prévue par la synthèse et des mesures réalisées avec un appareil commercial (droite).

Ces équipements nous ont par ailleurs amenés à lever deux verrous notoires qui persistaient depuis les années 90. Le premier verrou concernait l'extraction en champ lointain de la topographie de surface (en l'absence de données sur la phase), en lieu et place d'une caractérisation jusqu'ici limitée à des moments statistiques (spectres de rugosité). Le second verrou concernait l'extraction, dans la mesure de rugosité (de l'ordre d'une fraction de nm), de la contribution des défauts localisés (quelques défauts dans un champ de $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$). Ces 2 problèmes sont désormais résolus et ont mis en avant nos activités sur ce thème de la diffusion lumineuse, avec notamment 6 conférences invitées sur la période, 300 k€ de contrats industriels et le dépôt de plusieurs brevets [Amr-1, Aus-1].

4. Interaction laser matière aux forts flux

Les lasers de puissance mettent en jeu lors de leur interaction avec la matière des phénomènes physiques spécifiques et ouvrent de ce fait la voie à de nouvelles applications scientifiques, médicales et industrielles. L'endommagement laser, étudié depuis les débuts du laser, est défini comme toute modification irréversible de la matière lors de son irradiation par le laser. C'est un des verrous technologiques majeurs qui limite le développement des lasers de puissance, leur miniaturisation et leurs applications.

L'Institut Fresnel étudie l'endommagement laser depuis une vingtaine d'années, travaillant à la caractérisation destructive et non destructive, au développement de la métrologie des seuils de résistance laser (LIDT - Laser Induced Damage Threshold) et de modèles physiques de l'interaction. Les objectifs globaux de l'activité sont la compréhension des mécanismes fondamentaux mis en jeu dans l'interaction laser matière aux forts flux et le développement de matériaux et composants à haute tenue au flux laser. Les différents travaux concernent les lasers nanosecondes et sub-picosecondes pour un domaine spectral allant de l'ultraviolet à l'infrarouge et une large gamme de matériaux (massifs ou en couches minces, diélectriques ou métalliques, amorphes ou cristallins, linéaires ou non linéaires...). Les compétences expérimentales et théoriques ainsi développées ont amené le laboratoire à s'intéresser progressivement aux procédés laser, notamment à la stabilisation des dommages dans la silice par laser CO₂ et à la microstructuration de couches minces par laser sub-picoseconde.

L'interaction laser matière aux forts flux comporte aujourd'hui trois grands axes de recherche, l'étude des processus physiques de l'interaction laser matière aux forts flux, le développement de composants optiques pour laser de puissance et enfin les procédés laser. Ces différentes actions sont menées en collaboration avec des partenaires académiques français (CEA, CNES, ESA, LOA, LP3, IM2NP, CELIA...), internationaux (Universités de Vilnius et d'Hanovre, LZH...) et des partenaires industriels (REOSC, Thales SESO, Thales Optronique, Amplitude, CILAS, Cristal Laser, SILIOS...).

Etude des processus physiques de l'interaction laser-matière aux forts flux

Quels sont les mécanismes physiques aboutissant à la dégradation sous flux laser ? Répondre à cette question nécessite pour chaque application (durée d'impulsion, longueur d'onde, nombre de tirs, fréquence de répétition, taille de faisceau, angle d'incidence, polarisation, matériau (variation de la bande interdite), surface ou volume du

matériau...) de mettre en œuvre des expériences spécifiques. On peut citer : les mesures de seuils d'endommagement ou de vieillissement, l'étude des morphologies des impacts laser, les mesures en temps réel des modifications des propriétés optiques du matériau par expériences de type pompe/sonde ou des mesures de fluorescence induites sous flux... L'équipe développe en parallèle, de manière systématique, des modèles d'interaction laser matière adaptés, qui sont confrontés aux résultats d'expérience.

En régime sub-picoseconde [Gal-5, Rob-1, Sia-1, Soz-1, Soz-2, Wag-6, Wan-1] les processus électroniques, absorption multi-photonique, effet tunnel, photo-ionisation et avalanche électronique jouent un rôle majeur dans le transfert de l'énergie à la matière. Les expériences sont interprétées à l'aide de modèles basés sur les équations de taux (Single and Multiple Rate Equation SRE, MRE) prenant en compte les effets interférentiels dans les couches minces optiques et la réponse optique transitoire sous excitation. Les études paramétriques du seuil d'endommagement ont été réalisées en fonction de la longueur d'onde, de la largeur de bande interdite des matériaux [Rob-1], de la durée d'impulsion [Wag-6], du nombre de tirs,... sur différents matériaux en couches minces. Des techniques pompe/sonde comme l'holographie numérique résolue en temps ont permis d'étudier la dynamique de l'interaction laser/couches minces avec une technique d'imagerie d'intensité et de phase [Sia-1].

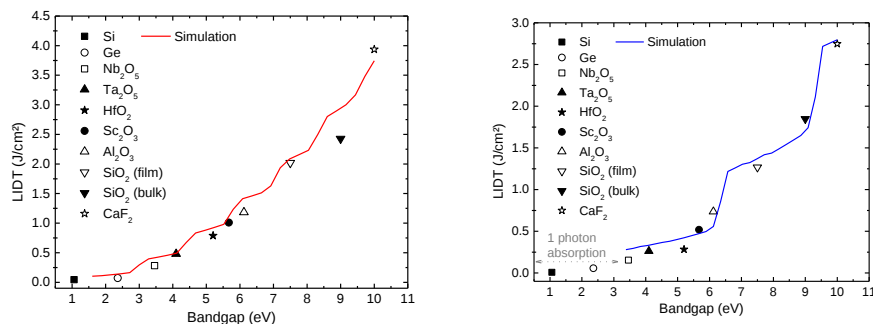


Figure 8 : Exemple de comparaison expérience/modélisation pour une étude paramétrique du seuil d'endommagement en fonction de la largeur de bande interdite.

En régime nanoseconde [Cha-1, Cha-2, Cha-3, Cha-4, Dem-1, Dia-1, Dia-2, Dia-3, Gou-1, Gou-2, Rey-1, Wag-2, Wag-3, Wag-4, Wag-5, Wag-6] les processus impliqués dans la formation des dommages sont nettement plus diversifiés. Au-delà des durées d'impulsions picosecondes (temps de relaxation diélectrique), les effets thermiques et électroniques notamment ne peuvent plus être dissociés. Les défauts du matériau, préexistants ou induits par l'irradiation jouent un rôle majeur. L'impulsion laser peut interagir avec la matière et la modifier du point de vue de ses défauts induits [Wag-2, Wag-5], de ses propriétés thermomécaniques [Dem-1, Rey-1, Rey-2] et l'interaction peut même se faire par l'intermédiaire du plasma créé dans l'air qui transfère l'énergie laser au composant testé [Cha-2, Dia-1]. L'interaction avec ces modifications du matériau dans certaines conditions de couplage laser-matériau est aussi la raison des effets que l'on peut observer lors d'une irradiation simultanée des composants avec différentes longueurs d'onde. De tels effets multi longueurs d'onde ont été observés pour des cristaux non-linéaires [Wag-2, Wag-4] et la silice synthétique [Cha-1]. Pour les études d'endommagement laser nanoseconde, il est nécessaire de définir un critère d'endommagement physique adapté au couple "conditions d'irradiation"-matériau. Pour les situations mono-tir le paramètre critique est la densité de défauts qu'on peut caractériser de manière destructive [Fu-1] ou non destructive [Gou-2, Com-2]. Pour les situations multi-tirs, une interaction à faible probabilité d'endommagement peut être révélée [Wag-3, Wag-6] ou au contraire des défauts stables peuvent être créés par l'irradiation [Gou-1, Wag-3], conduisant à un effet dit de fatigue ou vieillissement.

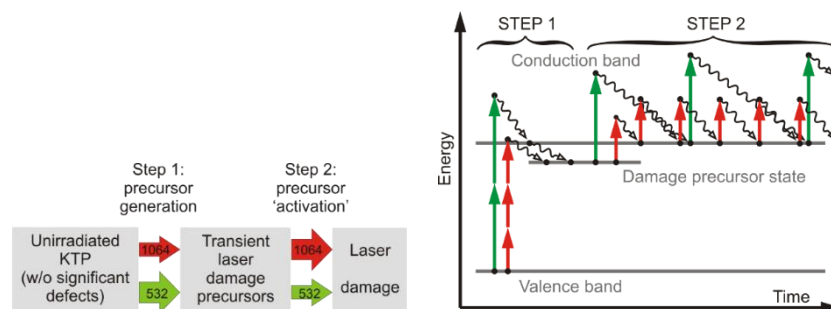


Figure 9 : le modèle global d'interaction développé pour décrire les phénomènes d'endommagement laser nanoseconde dans le KTP pour les longueurs d'onde 1064 et 532 nm et un nombre variable d'impulsions.

Composants optiques pour lasers de puissance

La question est ici : dans quelle mesure peut-on améliorer la résistance au flux laser pour une application donnée, des points de vue puissance crête, densité spatiale d'énergie, durée de vie du composant sous conditions réelles d'utilisation ? Quels matériaux et quelles structures sont les mieux adaptés à une application ?

Un certain nombre des travaux cités précédemment ont été menés dans le but d'améliorer des composants du Laser Mégajoule. Ce projet de grande envergure a permis de repousser les limites technologiques des composants optiques en particulier en ce qui concerne les cristaux de conversion en KDP et DKDP [Bus-4, Gou-2, Rey-1] et les couches minces optiques (notamment les miroirs dans l'infrarouge). Les études d'endommagement laser représentent dans ce contexte un outil d'évaluation des progrès faits dans la fabrication, et la compréhension des mécanismes d'endommagement permet de proposer les modifications pertinentes à faire en fabrication. Pour les projets liés aux applications spatiales (par exemple l'instrument Chemcam de la mission sur Mars Curiosity) l'apport des études d'endommagement laser est avant tout l'identification des composants à risque et la sélection du meilleur fournisseur. Une compréhension des causes de l'endommagement [Wag-1] est alors nécessaire pour pouvoir modifier le design de l'instrument spatial en vue d'une meilleure résistance et d'une durée de vie adaptée [Wag-6] tout en respectant les contraintes de dimensionnement et de poids de l'instrument. La même approche a été menée sur les cristaux de saphir dopés titane pour leur utilisation au sein des chaînes laser ultra-rapides de forte puissance crête [Wag-3]. L'étude de l'endommagement sous irradiation femtoseconde, picoseconde et nanoseconde, conditions rencontrées dans les chaînes laser CPA (Chirped Pulse Amplification) a permis d'identifier les paramètres clés qui doivent être optimisés dans les futures chaînes laser, de définir les conditions d'opération permettant à la fois la minimisation du risque lié à l'endommagement et l'accroissement des performances de la chaîne. Les études sont en cours pour les miroirs large bande de transport pour lasers de haute puissance à impulsions femtoseconde, comme le laser APOLLON (10 PW - 150 J - 15 fs), ou pour de nouveaux composants réflectifs pour les applications petawatt, Projet PETAL (7,2 PW / 3,5 kJ / 500 fs) [Nea-1].

Procédés laser

La troisième partie de l'activité porte sur la mise en application de l'interaction laser-matière pour chauffer, modifier et structurer la matière de façon contrôlée. Sur cette thématique nous pouvons citer 3 sujets de recherche traités :

- le micro-usinage de verres par interaction laser CO₂ / silice, qui est mis à profit pour développer des procédés de recyclage d'optiques endommagées par laser (collaboration avec le CEA dans le cadre du projet Laser MegaJoule) [Bou-2, Cor-1, Cor-2, Cor-3, Cor-4, Dou-1, Dou-2, Dou-3, Gal-4, Rey-1, Wag-3, Wan-1]. La "réparation" d'optiques couteuses est un enjeu majeur pour les grands projets en cours et à venir,
- l'ablation sélective de couches minces par laser femtoseconde pour la microélectronique sur support souple (projets CNRS, Carnot et Région) [Gal-3, Gou-1],
- la thermodésorption Laser pour la décontamination des réacteurs de fusion (projet AMIDEX).

RAYONNEMENT ET ATTRACTIVITÉ ACADÉMIQUES

- 1) **Médaille de bronze 2015 du CNRS** décernée à Guillaume Baffou.
- 2) **Prix Fabry de Gramont 2015** de la société française d'optique SFO et **prix Branly 2011** de la fédération française de sociétés scientifiques F2S décernés à Jérôme Wenger.
- 3) **Deuxième place** (sur 47) obtenue par Fabien Lemarchand lors du **Concours International " Design Contest 2013 "** organisé par l'*Optical Society of America*.
- 4) Durant la période 2011-2016, ~ **50 conférences invitées** ont été données par des chercheurs du laboratoire autour des thématiques de nanophotonique, incluant des conférences internationales majeures telles que SPP6, EMRS, NFO14, SPIE, META, GRS, ICMAT, ICUIL. ~ **30 conférences invitées** ont été données par des chercheurs du laboratoire autour des thématiques de l'interaction laser-matière et des couches minces optiques.
- 5) **Membres des comités scientifiques de la quasi-totalité des congrès mondiaux de couches minces optiques** (SPIE Optical Systems Design Conference, OSA Optical Interference Coatings, Frontiers of Optical Coatings Asia...) et des **comités des deux uniques conférences internationales dans le domaine de la résistance au flux laser des composants optiques** (Laser Damage Conference (Boulder, Colorado) Pacific Rim Laser Damage (Chine/Japon)).
- 6) **Coordination et supervision du groupe de travail "Quantum Coherence at the nanoscale" (wg3) au sein du projet collaboratif COST 1403 Nano Quantum Optics** par Thomas Durt. + Organisation de deux conférences-workshops à Marseille entre le 30-05 et le 03-06 2016 (du 30-05 au 01-06 : COST work group 3 workshop; du 01-06 au 03-06 : FQXI workshop) en parallèle avec une réunion du GDR ondes sur la plasmonique et une réunion du groupe LIA

franco-australien co-organisées par des membres de l'institut (plus de 100 inscrits au total pour ces diverses manifestations).

7) Heykel Aouani a reçu le **prix de thèse Aix Marseille Université** pour le domaine de la physique en 2012.

8) Jérôme Wenger est lauréat d'une **ERC Starting Grant** (2012-2017).

9) Nicolas Bonod est lauréat d'une **bourse Etoile Montante A*Midex** (2013-2014).

INTERACTION AVEC L'ENVIRONNEMENT SOCIAL, ÉCONOMIQUE ET CULTUREL

1) **Forte interaction dans des projets spatiaux avec le CNES** (~ 1 M€ sur la période) : filtres pixélisés, antireflets large bande, filtres nanophotonique, argentures rehaussés, diffusion aux grands angles, étude de la contamination des optiques sous flux laser... **Rapports sur le vieillissement des composants pour les applications spatiales.** Contrats avec Thales et CNES. Réalisation des tests pour le projet CHEMCAM (LIBS sur roches Martiennes) et suite de l'étude pour SUPERCAM qui équipera le nouveau rover Martien.

2) **Collaboration avec le CEA** dans le cadre d'une **convention générale de coopération scientifique** (AMU-CNRS-ECM / CEA) portant sur la tenue au flux laser des optiques pour les grandes chaînes laser de puissance (Laser MegaJoule et PETawatt Aquitaine Laser). (360 k€ sur la période, 2 brevets, 4 doctorants, une vingtaine de RICL en commun) **Rapports sur la faisabilité des miroirs pour utilisation dans le Laser Beam Circulator et la chaîne de transport du laser** - Phase 0, 1-A, 1B, 1C. 92 k€ de contrats sur la période. Fourniture de plus de 150 miroirs pour le projet ELI-NP d'ici fin 2017 - Contrats avec ALSYOM et le CNRS-LAL.

3) **Contrats industriels avec CILAS** (~250 k€ sur la période) pour la réalisation et la caractérisation (diffusion, tenue au flux laser) d'un ensemble de composants à base de couches minces optiques (en particulier pour le spatial).

4) **Laboratoire commun entre la société CILAS et l'Institut Fresnel** : LABTOP, Laboratoire de Traitement Optique des surfaces.

5) Nomination de M. Zerrad par l'AFNOR pour représenter la France dans les **comités internationaux pour la normalisation ISO de la métrologie de la diffusion lumineuse (BSDF et ARS)**.

6) **Nouvel instrument ultra-sensible pour la mesure de la transmission spectrale de filtres optiques interférentiels** avec une détectivité de 10^{-12} (soutien financier DGA et CNES), et application à la gestion des problématiques de diffusion lumineuse dans les couches minces optiques : une dizaine de rapports d'expertises livrés au CNES et à l'ESA et 200 k€ de contrats associés.

7) **Brevet en licence d'exploitation auprès de Horiba Jobin Yvon SAS : Réseau de diffraction réfléchissant optimisé**, Brevet CNRS, Ecole Polytechnique EP2513688 A1, Inventeurs : N. Bonod, J.-P. Chambaret.

8) **Brevet en licence d'exploitation auprès de Quantum SI : Dispositif pour la détection exaltée de l'émission d'une particule cible**, Brevet CNRS WO2008074938 A2, Inventeurs : H. Rigneault, P.-F. Lenne, J. Wenger, E. Popov, T. Ebbesen.

9) **Diffusion des faits marquants.** Les faits marquants sont diffusés au niveau national via le CNRS (revue CNRS Le journal, site web de l'INSIS, site web de la DR12...) et l'université Aix Marseille afin d'informer le plus largement de nos résultats phares. Sur la période 2011-2016, ils concernent:

- Février 2016, Optique : une première mondiale pour mesurer la transmission spectrale de filtres interférentiels, <http://www.cnrs.fr/insis/recherche/actualites/2016/02/filtres-interferentiels.htm>
- Juin 2015, Inauguration de l'espace photonique de l'Institut Fresnel <http://www.cnrs.fr/insis/recherche/actualites/2015/06/fresnel.htm>
- Septembre 2013, Biodétection : observer une molécule individuelle parmi un million d'autres avec une antenne optique, <http://www.cnrs.fr/insis/recherche/actualites/2013/antennes.htm>
- Juillet 2012, Des nano-antennes bio-inspirées pour la lumière, <http://www2.cnrs.fr/presse/communiqu/2713.htm?&theme1=4&debut=24>
- Mai 2011, Nano-Phare Moléculaire : transformer une molécule unique en une source lumineuse intense, <http://www.cnrs.fr/insis/recherche/direct-labos/2011/nanophare.htm>

IMPLICATION DU THÈME DANS LA FORMATION PAR LA RECHERCHE

- 1) **Création de trois unités d'enseignements** en 2015 dans le master M2 POESII-Europhotonics en lien direct avec les axes de recherches développés dans le thème : nanophotonique, interaction laser matière et couches minces optiques. Ces UE sont pilotées par des Enseignants/Chercheurs du thème.
- 2) Encadrement et suivi de ~ **30 Doctorants** sur la période.
- 3) **Ouvrage pour étudiants, enseignants et ingénieurs** : *De l'Optique électromagnétique à l'Interférométrie - Concepts et illustrations*, Michel Lequime et Claude Amra, EDP Sciences - Collection : QuinteSciences - septembre 2013.
- 4) **Organisations d'écoles d'été pour les doctorants** *Summer School on Plasmonics* : Porquerolles 2011 et Cargèse 2013 (150 inscrits pour chaque école). Organisateur Nicolas Bonod.
- 5) **Action Nationale de Formation CNRS "TENUE AU FLUX LASER DES COMPOSANTS OPTIQUES"**, 1-3 Juillet 2013.
- 6) Responsables de la **thématique nanophotonique du C'Nano PACA** (Nicolas Bonod, Jérôme Wenger et Aude Lereu) et organisateurs des journées scientifiques de Porquerolles qui permettent aux étudiants et post-doc de rencontrer et dialoguer avec des chercheurs.
- 7) **Lectures dans les conférences internationales de Couches Minces Optiques** (FOC 2014, Shanghai - C. Amra (3h) : Light Scattering in multilayer optics, OIC 2016, Tucson USA : M. Lequime (4h) : Nano-structured Materials: Fundamentals, Potential Applications and Practical Issues).
- 8) **Plasmonics: from basics to advanced topics**. Series: Springer Series in Optical Sciences, (Eds. Stefan Enoch, Nicolas Bonod) XVI, 321 p. 162 illus., 47 illus. in color. 2012.

STRATÉGIE ET PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES POUR LE FUTUR CONTRAT

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. Les axes principaux identifiés à ce jour concernent les applications des nanostructures pour la biophotonique, le développement de nouvelles méthodes et concepts pour l'électromagnétisme, et le traitement statistique de l'information.

1. Perspectives Nanophotonique

Une nouvelle activité de recherche en cours de développement porte sur le contrôle des transferts d'énergie aux échelles nanométriques par des nanostructures photoniques. Le transfert d'énergie entre molécules est un phénomène essentiel pour la photosynthèse, le photovoltaïque et les biotechnologies. Déterminer comment la nanophotonique peut améliorer le transfert d'énergie entre molécules est une question cruciale pour améliorer les processus de transfert d'énergie largement utilisés dans les sciences de la vie et les biotechnologies.

Les techniques de thermoplasmonique, désormais bien établies, ont pour objectif d'appliquer le contrôle nanométrique de la distribution de température pour résoudre des problèmes actuels en chimie et en biologie. Parmi les problématiques abordées, nous étudierons la polymérisation thermo-induite de microtubules dans des cellules vivantes individuelles, et nous analyserons les sources du nouveau phénomène de guidage optique de neurones.

Par ailleurs, les recherches autour des résonateurs de Mie tout-silicium seront développées pour réaliser de nouvelles sources optiques infrarouges avec des nanoantennes diélectriques. L'utilisation d'antennes optiques en bout de fibre effilée permet un positionnement 3D des antennes par rapport à des éléments d'intérêt (sources lumineuses, nanoparticules ou molécules organiques). La combinaison des avancées récentes des nanoantennes avec les techniques de microscopie en champ proche est un domaine émergent prometteur de nombreuses applications, notamment en biophotonique.

2. Perspectives Couches Minces Optiques

Le domaine des filtres optiques interférentiels a suscité un très fort regain d'intérêt ces dernières années, en particulier grâce aux avancées récentes de la technologie des couches minces optiques dont l'Institut Fresnel est aujourd'hui doté et qui sont implantées au sein de la plateforme technologique Espace Photonique. De ce fait l'Institut Fresnel est à même de pouvoir continuer à réaliser des composants toujours plus complexes et performants. Il est évident que cette maturité continuera à être utilisée au cours du prochain quadriennal, et ce, afin de répondre aux demandes extérieures extrêmement complexes qui ne peuvent être réalisées par des industriels extérieurs (e.g. projets spatiaux). Au-delà de ces aspects de fabrication de composants aux performances ultimes, diverses activités de recherche nouvelles seront développées. Parmi celles-ci on peut notamment citer le design et la réalisation de composants micro- et nanostructurés : les objectifs affichés sont la démonstration de métamatériaux pour l'optique à base de couches métalliques et diélectriques (e.g. métamatériaux hyperboliques) ou la réalisation de métasurfaces. En effet, une analyse est en cours pour envisager d'introduire, au cœur de nos technologies, les propriétés nouvelles (notamment de phase) que peuvent théoriquement offrir les métasurfaces ou les métamatériaux.

Les activités liées à la réalisation de composants à base de verres de chalcogénures seront également prolongées avec comme objectifs principaux la nanostructuration en volume de ces couches pour la réalisation de filtres à réseaux résonnants intégrés ou la réalisation de métasurfaces et l'application de ces matériaux à la réalisation de composants optiques multicouches performants pour l'infrarouge.

Enfin, d'un point de vue technologique, nous nous intéresserons à l'exploitation de la mesure de phase in situ de composants multicouches en cours de dépôt et ce afin de proposer de nouvelles alternatives innovantes et performantes au contrôle optique actuellement réalisé en intensité.

L'activité diffusion lumineuse est également riche de perspectives, avec 2 brevets récents dont les projets de maturation sont déjà en cours avec la SATT AMU. Un mode opératoire en lumière blanche a en effet permis de concevoir un instrument entièrement original capable d'extraire la rugosité de façon instantanée, à partir d'une mesure unique dans une direction arbitraire. De façon complémentaire, un second procédé basé sur l'utilisation conjointe de 2 faisceaux permet désormais de recouvrer à moindre effort la topographie bidimensionnelle des surfaces. Ces 2 systèmes fonctionnent en champ lointain et devraient rapidement être appliqués dans les secteurs de l'optique, la microélectronique, la mécanique, la cosmétique et les textiles... Enfin, d'autres idées sont actuellement à l'étude et portent sur les optiques microstructurées, la métrologie des exaltations géantes, la reconstruction sans phase, ou encore la diffusion "blanche".

3. Perspectives Interaction laser matière aux forts flux

Outre le maintien de ses domaines d'expertises cités plus haut, d'autres activités sont en cours de développement. D'une part, nous portons un effort particulier sur la mise en œuvre de nouveaux diagnostics non destructifs en ligne (techniques pompe/sonde, mesure de changement d'indice linéaire et non linéaire in situ (microscopie quantitative de phase (Phasics), technique du Z scan). Ces nouveaux diagnostics en ligne, appliqués à la thématique de l'endommagement laser, permettent déjà de reculer les limites de détection actuelles des modifications du matériau et constituent des moyens complémentaires précieux pour l'analyse du processus d'interaction, préliminaire à l'endommagement. D'autre part, nous affichons une volonté forte de nous orienter vers la fabrication de composants optiques par photoinscriptions. L'idée, est de pouvoir obtenir des résolutions inédites (dizaines de nanomètres) en photoinscription par l'utilisation d'effets non linéaires dans les films minces. Dans ce sens nous avons recruté un enseignant chercheur en 2015, spécialiste du stockage optique. De plus, l'accès à l'Espace Photonique de l'Institut Fresnel et les compétences de l'Institut sur la réalisation de matériaux en couches minces constitueront un atout unique pour concrétiser ce projet. Enfin, une thématique totalement nouvelle, concernant la contamination induite par laser (LIC), est portée en collaboration avec le CNES et THALES. Il s'agit d'étudier les mécanismes de contamination qui apparaissent sur les sources laser dédiées aux applications spatiales. A ce jour, seulement une équipe de l'ESA et du DLR se sont impliquées sur cette problématique difficile. Les problèmes de contaminations des optiques pour le spatial sont aujourd'hui tout aussi importants que le choix et les qualifications des composants sur lesquels nous intervenons déjà. Une maîtrise de l'ensemble des problématiques des sources laser en environnement spatial nous donne un positionnement unique sur l'activité.

Liste des ingénieurs, chercheurs et enseignants-chercheurs

Laetitia ABEL TIBERINI, Hassan AKHOUAYRI, Claude AMRA, Guillaume BAFFOU, Thomas BEGOU, Jean BITTEBIERRE, Nicolas BONOD, Mireille COMMANDRE, Guillaume DEMESY, Thomas DURT, Stefan ENOCH, Laurent GALLAIS, Konstantinos ILIOPOULOS, Cihan KOC, Fabien LEMARCHAND, Frédéric LEMARQUIS, Michel LEQUIME, Aude LEREU, Julien LUMEAU, Jean-Yves NATOLI, André NICOLET, Evgueni POPOV, Hervé RIGNEAULT, Nicolas SANDEAU, Brian STOUT, Gérard TAYEB, Frank WAGNER, Jérôme WENGER, Myriam ZERRAD

THEME 3 - TRAITEMENT DE L'INFORMATION ET ONDES ALÉATOIRES

Coordonnateurs : Frédéric Galland et Salah Bourennane

RÉALISATIONS

Dès que l'on cherche à analyser les propriétés d'une onde, à la mesurer ou à en faire une image, que ce soit pour la caractériser ou pour remonter à différents paramètres du milieu ayant interagi avec cette onde, se posent des questions sur l'extraction et le traitement de l'information pertinente associée, mais également sur l'analyse des propriétés statistiques de cette onde ou de la précision de l'information reconstruite. La notion d'aléatoire se retrouve au cœur de ce thème, qui regroupe des activités en lien avec le traitement de l'information et la prise en compte de l'aspect aléatoire ou désordonné des grandeurs considérées. Ce thème fédère 18 enseignants-chercheurs, chercheurs et ingénieurs de recherche (correspondant à 6,25 équivalents temps-plein) en traitement du signal et des images, en optique statistique, en modélisation optique et électromagnétique. Au cours de la période 2011-2016, il a généré 103 publications dans des revues internationales à comité de lecture, et se décline en quatre sous-thèmes :

- polarisation et cohérence optique,
- télécommunications et traitement d'antenne,
- traitements et modèles pour la télédétection,
- éléments méthodologiques pour l'image et le signal multi-dimensionnel.

Ce thème présente également de forts liens avec les autres thèmes de l'institut Fresnel. C'est en particulier le cas avec le thème **Imagerie avancée - vivant** où sont recensés divers travaux sur le développement de nouvelles techniques de traitement d'image dédiées à la microscopie, sur la caractérisation et la co-conception de nouvelles modalités d'imagerie microscopique fondées sur des approches issues du traitement de l'information, ou sur des problèmes inverses pour la reconstruction d'images super-résolues. Parallèlement, des liens importants avec les thèmes **Electromagnétisme et métamatériaux** et **Nanophotonique et couches minces optiques** apparaissent dans les sous-thèmes *polarisation et cohérence optique* et *traitements et modèles pour la télédétection*.

PRODUCTION SCIENTIFIQUE

1. Polarisation et cohérence optique

Pour tenir compte de la nature aléatoire (temporelle) du champ électromagnétique en interaction avec un milieu complexe (spatialement) déterministe, il est intéressant de coupler les expertises du domaine de l'optique statistique et de l'optique électromagnétique. Cette synergie a permis de mettre en évidence nombre de résultats originaux sur la période, notamment la dépolarisation spatiale et sa nature multi-échelle en lien avec la microstructure des milieux [Zer-3] (figure 1), le phénomène de repolarisation temporelle par un milieu désordonné [Amr-1, Zer-1], la dispersion spatiale du temps de cohérence [Sor-1], et l'influence de la spectralité sur l'ensemble de ces phénomènes [Sor-2]. Pour confirmer ces prédictions, une instrumentation dédiée [Gha-1] a été mise en œuvre dans le cadre d'un projet ANR TRAMEL (2011-2015) et donne accès aux histogrammes spatiaux du degré de polarisation à l'échelle du champ de speckle. Ces résultats fournissent de nouvelles signatures des milieux complexes [Gha-3] (figure 2), qualitatives et quantitatives, susceptibles de trouver des applications dans le domaine de l'éclairage, le spatial, la sécurité, le vivant ou l'alimentaire.

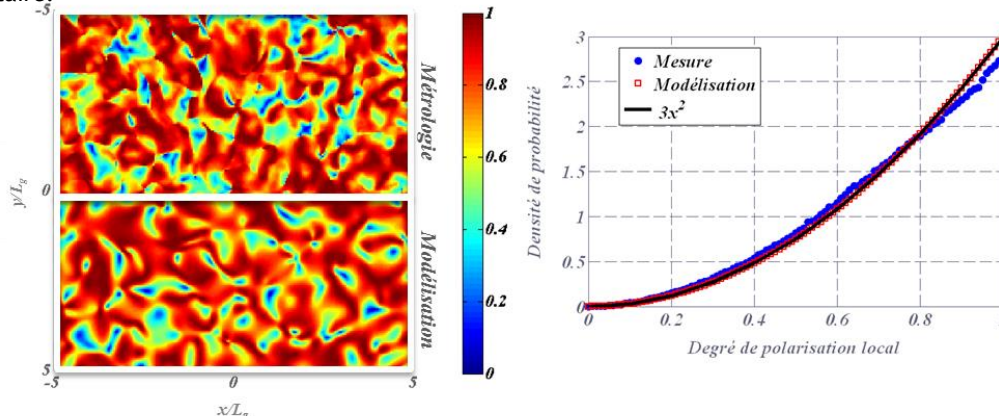


Figure 1 : Mise en évidence du phénomène de repolarisation de la lumière par un milieu diffusant. Cartographies du degré de polarisation local mesuré (en haut à Gauche) et modélisé (en bas à Gauche) [Amr-1,Zer-1]. Les histogrammes des deux cartographies (droite) suivent parfaitement la loi analytique prédictive [Ref-1] en $3x^2$.

Parallèlement, les études sur le comportement irréversible de certaines propriétés de la lumière soumise à des transformations linéaires aléatoires ont été poursuivies. C'est en particulier le cas pour le degré de polarisation quand celui-ci varie en dimension 3 [Ref-2], pour les relations entre le degré de polarisation temporel et spectral [Ref-3], pour l'analyse de certains états intéressants de la lumière partiellement cohérente [Ref-5] ainsi que pour la généralisation de la théorie des degrés intrinsèques lorsque la polarisation varie en dimension 3 qui a été développée récemment [Ref-6]. Une caractérisation théorique des propriétés de polarisation et de cohérence a également été proposée quand la lumière est modifiée par des objets totalement dépolarisant [Ref-1]. De nouvelles études ont été conduites pour analyser des propriétés telles que celles décrites par les corrélations d'intensité (Hanbury Brown and Twiss effect) [Ref-4] et le théorème de Van Cittert-Zernike [Ref-7] en présence de lumière partiellement polarisée. Des transferts de symétrie de polarisation vers les propriétés de cohérence ont pu être montrés à l'aide de la théorie des degrés intrinsèques [Ref-7] lorsque la lumière se propage à partir d'une source spatialement incohérente.

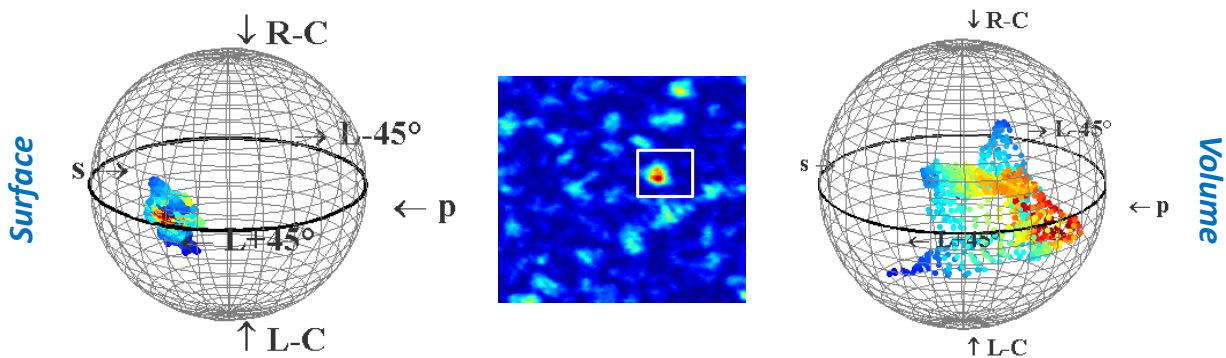


Figure 2 : Représentation sur la sphère de Poincaré, de la mesure de la dispersion des états de polarisation à l'intérieur d'un grain de speckle [Gha-1, Gha-2]. Mise en évidence des différences de comportements des diffusions d'origine surfacique et volumique. Les couleurs représentent les niveaux d'énergie de chaque point.

2. Télécommunications et traitement d'antenne

Avec l'émergence des réseaux de capteurs, il y a un besoin important en traitement efficace des signaux multidimensionnels, et en transmission haut-débit et sécurisée des informations. Nous avons travaillé au cours de ces cinq dernières années sur ces différents aspects. Plus précisément nos travaux ont porté sur l'extraction d'information à partir des observations, sur la caractérisation d'un milieu de propagation, sur le cryptage de l'information, et sur la transmission haut-débit de données.

En télécommunications, afin de concevoir de nouvelles techniques de traitement du signal pour augmenter la capacité du canal de transmission, nos travaux ont porté sur l'estimation du canal pour les systèmes multi-antennes de type MIMO [Sim-1], ainsi que sur la détection du signal et l'estimation du canal pour les réseaux de capteurs sans-fil coopératifs en prenant en compte le codage espace-temps en blocs effectué au niveau de relais [Zha-1, Kha-1, Zha-2], une de nos spécificités fortes étant l'étude des systèmes de communication optique sans fil. Pour ces derniers, nous avons notamment travaillé sur la modélisation du canal de propagation, la diversité spatiale, le codage et la modulation, le codage espace-temps pour les structures MIMO, les réseaux FSO coopératifs, et la transmission hybride RF/FSO [Kha-2, Yan-1, Lee-1, Gha-2, Yan-2, Lee-2, Yan-3, Yan-4, Kha-3]. Dans le contexte intra-bâtiment, nos travaux de recherche concernent les communications optiques dans le spectre visible (VLC pour Visible Light Communications, aussi appelé LiFi) qui utilisent les éclairages LED pour la transmission de données, et plus précisément la modélisation du canal et les schémas de transmission à grande efficacité spectrale pour ces systèmes. Nous avons également étudié les communications optiques sans-fil dans les milieux aquatiques qui permettent de bénéficier d'un débit très élevé, une grande efficacité énergétique, et un faible niveau d'interférences, en travaillant sur les aspects de modélisation du canal de propagation et des techniques de codage et modulation, en particulier dans [Gab-1].

La détection et la localisation de sources rayonnantes dans un milieu pouvant générer des trajets multiples, constituent un enjeu primordial dans de nombreuses applications. Les principales difficultés des méthodes robustes existantes proviennent essentiellement de deux aspects, à savoir, la corrélation des signaux, et la dépendance entre le nombre maximal de signaux à caractériser et le nombre de récepteurs. Pour la détection et la localisation de sources, nous avons introduit une nouvelle modélisation des signaux observés sur les récepteurs, en considérant indépendamment la richesse de l'information spectrale du signal disponible au niveau de chaque capteur, permettant d'une part de décorréler les signaux, et d'autre part d'estimer les temps d'arrivée de tous les trajets contribuant au signal reçu. Nous avons créé un nouvel algorithme haute résolution d'estimation des temps d'arrivée. Nous avons également développé une méthode d'association des différents temps d'arrivée pour estimer les angles d'arrivée et les distances des sources [Vil-1, Vil-2].

Nous avons appliqué nos algorithmes à la détection et localisation d'objets enfouis dans le milieu marin [Fos-1, Bou-3]. Ces méthodes dites à sous-espace ont ensuite pu être étendues aux signaux multidimensionnels avec des applications en imagerie hyperspectrale.

Au cours de ce quadriennal, nous nous sommes également intéressés à la cryptographie quantique en utilisant la théorie de l'information quantique qui permet de résoudre des problèmes non résolus classiquement, plus particulièrement au générateur de nombres aléatoires quantique [Dur-1, Dur-2], à l'encodage quantique [Dur-3] et au clonage quantique [Dur-4].

3. Traitements et modèles pour la Télédétection

La télédétection est un moyen privilégié pour l'analyse et la surveillance des surfaces continentales et des océans. Afin de répondre aux défis soulevés par cette thématique, différents travaux ont été menés à l'institut Fresnel : modélisation de la diffraction sur des données océaniques, estimation de paramètres de végétation et de la colonne d'eau, réduction de dimensions et amélioration du rapport signal à bruit pour les données multivariées, séparation de sources pour retrouver une information sub-pixel. Ce sous-thème, en forte interaction avec les trois autres sous-thèmes, fédère différentes compétences en traitement du signal ou des images, estimation statistique et modélisations électro-magnétiques.

Dans le cadre de l'étude des océans, la compréhension des interactions entre ondes et surface de la mer est nécessaire pour l'interprétation des mesures radar et radiométriques. Notre compétence en modélisation numérique rigoureuse de la diffraction des ondes électromagnétiques, nous a permis de faire les premières simulations de spectre Doppler océanique microonde en incidence rasante, au plus proche des conditions expérimentales [Mir-1] et de valider de nouvelles méthodes analytiques sur des modèles de mers linéaires [Nou-1] et faiblement non-linéaires [Nou-2]. Des travaux ont également été menés en imagerie optique sous-marine en collaboration avec l'Ifremer (ANR Osifrost) concernant le développement d'un simulateur pour la caractérisation des principales sources de dégradation des images en milieu profond [Bof-1]. De plus, l'intérêt d'utiliser une source de lumière polarisée pour améliorer les performances des algorithmes de recalage d'images sous-marines a été quantifié à l'aide d'outils statistiques [Bof-2].

En imagerie hyperspectrale aéroportée, nous avons développé des méthodes pour l'analyse de zones côtières (REI (DGA) HypLitt, TOSCA (CNES) HypMed, ASTRID HypFoM (ANR/DGA)) : détection de cibles immergées [Jay-1] (figure 3), estimation des paramètres de la colonne d'eau (bathymétrie et concentrations des constituants) [Jay-2], et calcul de la précision théorique associée. Nous avons également modélisé le cas non stationnaire où la bathymétrie varie et nous avons intégré différentes informations *a priori* [Jay3] pour améliorer les performances des algorithmes. Nous avons de plus introduit une méthode d'estimation/dé-mélange des fonds marins fondée sur une factorisation en matrices non négatives (NMF) dans le processus d'estimation des paramètres de la colonne d'eau et de la réflectance du fond (best paper award, WHISPERS 2015).

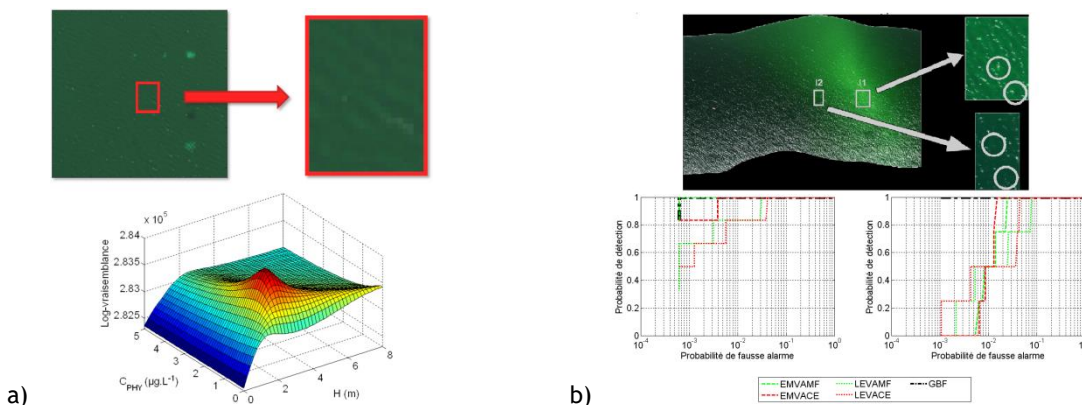


Figure 3 : a) Log-vraisemblance de l'échantillon en fonction de la bathymétrie et de la concentration en phytoplancton, b) Détection de cibles immergées et courbes COR des filtres de détection 'bathymétriques'

En imagerie radar, la collaboration avec l'ONERA pour l'analyse des systèmes SAR polarimétriques et interférométriques (PolInSAR) s'est poursuivie sur l'étude de l'évolution de la biomasse sur Terre. Nous avons développé une caractérisation des précisions d'estimation des paramètres de végétation à l'aide de la borne de Cramer Rao [Rou-1] pour le système complet mais également quand des systèmes sous-optimaux sont mis en œuvre à bord des satellites [Arn-1]. L'analyse reste néanmoins complexe car cette précision dépend *a priori* de vingt paramètres inconnus. Nous avons cependant montré que le modèle possède des propriétés d'invariances statistiques importantes et que la difficulté des estimations est en réalité totalement déterminée par uniquement quatre paramètres [Ref-8].

En imagerie hyperspectrale, nous avons appliqué de manière originale des méthodes fondées sur les décompositions tensorielles pour la réduction de dimension et la réduction du bruit en préservant les signaux ou objets faiblement

représentés dans les données [Bou-2], prenant en compte la structure initiale des données et la diversité du bruit. Les méthodes utilisées sont basées soit sur la décomposition PARAFAC pour un bruit thermique et photonique, et/ou coloré [Bou-4, Liu-2], soit sur la décomposition de Tucker [Bou-6, Jua-1, Lin-1]. Nous avons montré l'efficacité de nos algorithmes à l'aide des bornes de Cramer-Rao [Liu-3].

Nous avons également développé des méthodes de dé-mélange spectral aveugles, basées sur la factorisation en matrices non négatives (NMF), pour l'estimation de spectres purs peu présents spatialement dans la scène [Bou-1], grâce à la théorie du bootstrap ou en introduisant une contrainte sur la structure géométrique des données [Xia-1]. Afin d'améliorer l'analyse sub-pixel dans le cas d'une résolution spatiale insuffisante, nous avons évalué l'apport de contraintes spatiales et spectrales spécifiques sur la qualité du dé-mélange [Che-1]. Enfin, un modèle doublement quadratique représentatif du transfert radiatif dans les milieux naturels a été introduit [Ech-1] pour résoudre le problème du dé-mélange aveugle dans le cas d'interactions multiples au niveau du sol (mélanges non-linéaires).

4. Éléments méthodologiques pour l'image et le signal multi-dimensionnel

Cette activité regroupe différents travaux méthodologiques en traitement du signal et de l'image, en particulier dans le cas d'images fortement bruitées, comme par exemple en présence de bruit de speckle inhérent à l'imagerie cohérente, lorsque l'on observe de faibles niveaux de photons, ou en présence de bruits colorés dans le cas de données multi-dimensionnelles.

Le problème de la segmentation d'image, qui constitue un des principaux verrous en traitement d'image, a constitué un axe de recherche important et a été abordé à travers différents points de vue méthodologiques et différents domaines applicatifs.

Parmi ces approches, des travaux ont été menés sur la problématique de la détection de contours à forte concavité. Les solutions proposées transforment de façon originale le problème de détection de contours en un problème d'estimation d'amplitude et de fréquence de signaux, et l'adaptation de statistiques d'ordre supérieur les rend efficaces même en présence de bruit corrélé. La génération d'une signature bidimensionnelle permet une caractérisation unique de tout type de contour [Jia-1, Jia-2]. Ces travaux, dans la continuité de nos premiers résultats sur la reconnaissance de geste [Bou-5], ont permis de développer une nouvelle technique de caractérisation dynamique des postures de la main, indépendante de sa couleur [Bou-1]. Ils ont fait l'objet de l'accompagnement à la création et au développement d'une Start-up, IntuiSense-Technologies.

Parallèlement, afin d'aboutir à des techniques de segmentation non supervisées, rapides et adaptées aux images fortement bruitées, les travaux sur les contours et grilles actifs polygonaux fondés sur des critères issus de la théorie de l'information ont été poursuivis dans le cas d'images de textures directionnelles [Dac-1] ou lorsque les images peuvent contenir simultanément des objets polygonaux et des objets arrondis [Gal-1]. De plus, grâce à une prise en compte de l'adéquation algorithme-architecture, une technique de segmentation en deux régions ultra-rapide (moins de 5 millisecondes pour une image de 256×256 pixels sur un ordinateur standard) ne nécessitant ni paramètre à régler dans le critère d'optimisation ni connaissance a priori sur le bruit dans l'image, a été développée [Ber-1]. Cet algorithme ultra-rapide et non supervisé a alors été utilisé pour le pilotage d'un système d'imagerie polarimétrique actif [Ann-1, Van-1, Van-2] (ANR AutoPOL, en collaboration avec le laboratoire C. Fabry et Thalès TRT) et pour le développement de nouvelles techniques de segmentation, capables par exemple de s'adapter à des images fortement inhomogènes [Liu-1] (figure 4).

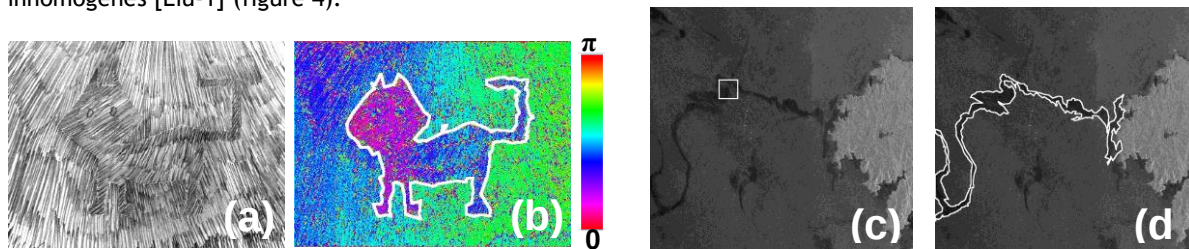


Figure 4 : Segmentation d'images inhomogènes par contour actif polygonal [Liu-1]. (a) Image texturée (396x295 pixels) - (b) Segmentation de l'image d'orientation de la texture (temps de calcul : 87 millisecondes) - (c) image SAR d'une nappe de pétrole (fournie par l'ESA, 662x702 pixels) - (d) Segmentation associée (temps de calcul : 227 millisecondes). Résultats obtenus sur PC cadencé à 3.2 GHz (contours initiaux affichés sur a et c), et en utilisant exactement le même algorithme. Reprinted from [Liu-1] with permission from Elsevier.

Des résultats ont aussi été obtenus sur les chaînes de Markov couple, conduisant à plusieurs applications en classification non supervisée et en segmentation d'images bruitées [Der-1, Der-2, Der-3, Der-4, Der-5, Gho-1]. Ces travaux sur les chaînes de Markov combinés avec l'utilisation de modèles de Kalman ont également permis de traiter des applications de poursuite temps réel d'un phénomène à variations rapides comme par exemple en biométrie dynamique pour le suivi de l'œil et la caractérisation de l'iris [Nem-2]. Ces travaux intègrent de nouvelles possibilités

d'interactions entre états cachés et observations. Les algorithmes originaux proposés permettent d'intégrer des contraintes a priori sur les paramètres du système étudié [Aba-1,Nem-1,Nem-3]. La contrainte temps réel a nécessité une méthode de sélection 'au vol' des images de bonne qualité.

Un deuxième axe de recherche important a porté sur le traitement des signaux multi-dimensionnels. Dans la continuité de nos travaux antérieurs, de nouvelles méthodes de traitement tensoriel de signaux multidimensionnels [Liu-4,Lin-2] ont été développées à partir des décompositions Tucker et PARAFAC associées à la transformation en ondelettes " tensorielle ", permettant de prendre en compte les différents types de bruits associés à l'évolution des capteurs et d'adapter les méthodes à la détection d'objets de taille inférieure au pixel. Différentes méthodes de traitement de signaux multidimensionnels [Bou-7] ont également été utilisées pour concevoir des techniques de détection, classification et reconnaissance, permettant en particulier l'extraction de paramètres 2D et 3D pour de la reconnaissance faciale [Oua-1, Cho-1, Cho-2], ou pour la détection non destructive de défauts dans des surfaces métalliques thermographiques [Ben-1].

Des travaux en poursuite de cibles, en segmentation d'images, ou exploitant l'aspect multi-dimensionnel des signaux, ont également été menés en collaboration avec le CHU de la Timone pour l'aide au diagnostic assisté par ordinateur en imagerie médicale. Dans ce cadre, une méthode automatique de poursuite statistique locale fondée sur un critère de Maximum a Posteriori (MAP) a été développée, puis appliquée au cas de la segmentation de l'arbre vasculaire rétinien sur des images du fond de l'œil et des angiographies rétiniennes [Yin-1,Xia-2,Yin-2]. Parallèlement à cela, l'étude de la texture multidimensionnelle hyperspectrale a permis d'obtenir des résultats prometteurs en classification, en particulier pour des images d'histopathologie [Khe-1,Khe-2,Khe-3]. Enfin, la quantification de la pertinence de régions d'intérêts du cerveau quant à la classification d'images de Tomographie par Emission de Positons entre sujets sains et sujets atteints d'une maladie dégénérative du cerveau (Alzheimer), a été élaborée sur la base de paramètres statistiques issus de la construction de courbes ROC [Gar-1,Gar-2]. La collaboration initiée par ces travaux avec le CHU de la Timone et le Cerimed, devrait aboutir à l'intégration d'une nouvelle équipe d'imagerie médicale à l'Institut Fresnel.

Par ailleurs, un grand nombre des travaux menés permettent d'irriguer les autres activités de ce thème, en particulier l'activité *traitements et modèles pour la télé-détection* (traitement de données multi-dimensionnelles en imagerie hyper-spectrale, segmentation et traitement de données perturbées par un fort bruit de speckle en imagerie SAR et PolInSAR) ainsi qu'avec l'activité *télécommunications et traitement d'antenne*. Enfin, plusieurs travaux en détection et suivi de particules et en segmentation d'image (fondées également sur des techniques statistiques adaptées au fort niveau de bruit présent dans les images et sur des concepts en théorie de l'information) sont intégrés dans des techniques de microscopies hautes résolutions (ANR NanoDIGICODE et AMIDEX LightInBio) et de microscopies de phase présentées dans le thème *imagerie avancée - vivant*.

RAYONNEMENT ET ATTRACTIVITÉ ACADÉMIQUES

1. Participation à des réseaux scientifiques

- Membre du comité de management de l'Action FP7 COST IC1101 "OPTICWISE : Optical Wireless Communications - An Emerging Technology ", Vice-Chair du WP2 (Physical Layer Algorithm Design and Verification)
- Participation active au GdR ISIS, GdR STIC-SANTE et au GdR Ondes (organisation de plusieurs journées, présentations invitées)
- Participation aux pôles Optitec, Mer-Paca et SAFE
- Contribution au développement de l'axe traitement d'image au sein du CERIMED (Centre Européen de Recherche en Imagerie MEDicale) : participation au comité de pilotage, co-responsabilité de l'axe traitement d'images.
- Responsabilité du Workpackage traitement d'images du Département Hospitalo-Universitaire (DHU Imagerie) de l'Université d'Aix-Marseille.
- Participation à l'institut Carnot STAR (membre des comités), à la fondation universitaire A*MIDEX, au Centre de Recherche et d'Enseignement de Géosciences de l'Environnement (membre du conseil scientifique), membre de l'incubateur Impulse, membre du conseil scientifique de l'Ecole Doctorale ED 352 Physique et science de la matière.

2. Implication dans des projets nationaux ou internationaux

- Projet ANR TraMEL (transition multi-échelle entre régimes de polarisation de la lumière diffuse) porté par l'institut Fresnel, en collaboration avec l'ONERA.
- Projet ANR astrid Radiolibre (imagerie active temps-réel de dépolarisation par brisure d'orthogonalité), en collaboration avec l'Institut de Physique de Rennes.

- Projet REI DGA HypLitt (détection d'objets en zone côtière) porté par l'institut Fresnel, en partenariat avec l'entreprise Actimar, de 10/2010 à 10/2012.
- Projet ANR/DGA ASTRID HypFoM (analyse des fonds marins et des zones littorales par imagerie hyperspectrale aéroportée), porté par l'Institut Fresnel, en partenariat avec le LSIS, le LOV, L'IRAP et l'entreprise CS-SI, de 01/2016 à 07/2018.
- Projet ANR OSIFIOST (outil de simulation pour la formation des images optiques sous-marines en milieu turbide) du 01/2009 au 06/2012 en partenariat avec l'Ifremer, le LOV et l'entreprise Prolexia.
- Projet ANR AutoPol (imagerie de polarisation automatisée), en collaboration avec le laboratoire Charles Fabry et Thalès TRT.
- Projet Hyper PixSep (Carnot STAR) en partenariat avec le laboratoire LSIS.
- Projet MUJI en partenariat avec l'entreprise Intuisense.
- Programmes ARCUS Maghreb avec la Tunisie et l'Algérie (PACA et MAE).

3. Attractivité nationale et internationale (recrutement, chercheurs invités)

Nous avons accueilli 5 chercheurs invités :

- A. Bouridane, full Professor, Northumbria University at Newcastle (UK)
- Miguel A. Alonso, associate professor of optics, university of Rochester (USA) (conjointement avec le thème imagerie avancée - vivant)
- Hoa Le Minh, Lecturer, Northumbria University at Newcastle (UK)
- Konstantinos Peppas, Associate Professor, Université de Péloponnèse, (Grèce)
- Eric Simon, Maître de conférences, laboratoire IEMN, Lille

4. Organisation de manifestations scientifiques

- La journée EPOS (Electromagnétisme, Polarisation et Optique Statistique) a vu le jour dans le cadre des activités sur cette thématique en 2011. Elle réunit tous les deux ans 60 à 80 acteurs nationaux du domaine (soutien GDR Ondes et abondement ANR-Optitec, Porteur : M. Zerrad).
- Co-organisateur de la conférence : International Conference on Remotely Piloted Aircraft Systems Related Technology, 5-6 November 2015, in Paris - Le Bourget.
- Organisation de plusieurs journées au sein du GdR ISIS (Résolution de problèmes inverses : optimisation et parallélisation, Transmission optique sans-fil : problématiques et nouvelles avancées, Analyse de tissus biologiques par histopathologie numérique)

5. Participations à des expertises

- Expert-évaluateur auprès du MENESR Mission Europe et International pour la Recherche, l'Innovation et l'Enseignement Supérieur.
- Expert pour l'Israël Science Foundation (Israël), pour le Fonds de la Recherche Scientifique (FNRS) et le Research Foundation - Flanders (Belgique), pour le Centre National pour la Recherche Scientifique et Technique - CNRST (Maroc), et pour le Czech Science Foundation.

INTERACTION AVEC L'ENVIRONNEMENT SOCIAL, ÉCONOMIQUE ET CULTUREL

1. Partenariats avec des acteurs socio-économiques

Au cours de ce quadriennal, nous avons eu des collaborations fortes avec différents organismes :

- Collaboration avec l'ONERA de Salon de Provence : 2 financements annuels TOSCA du CNES (9k€ par an) et 1 étude R&T du CNES (25 k€), 2 co-encadrements de thèses (co-financement région PACA et ONERA), 1 post-doc (financement CNES)
- Collaboration avec l'Ifremer de la Seine-sur-Mer : ANR OSIFIOST (du 01/2009 au 06/2012, montant alloué pour l'institut Fresnel: 124 269€), financement d'une étude (2 000€), co-financement de 3 thèses.
- Collaborations avec le CNES : financement de 2 contrats R&T (15 k€ et 45 k€) - 1 brevet en copropriété CNES/AMU/CNRS - co-financement d'une thèse CNES/PACA.

- Collaborations avec le CEA-Cadarache (co-financement d'1 thèse).

Ce thème a également cherché à créer et à renforcer ses collaborations avec des entreprises : la startup **IntuiSense** (aide à la création et au développement, co-financement de 2 thèses), la société **Evaelys** (1 thèse co-financée), la société **Action-Environnement** (1 thèse financée), la société **EuroShaktiware**, le **Fraunhofer Institute** d'Erlangen (2 thèses financées), l'entreprise **Prolexia**, l'entreprise **Detect-Réseau**, l'entreprise **Galderma**, la société **Noveltis**, la société **Nicesoft-Segami**, la société **Actimar** et la société **CS-SI**, ainsi qu'avec de grands groupes : **Thalès TRT**, **Thalès TOSA**, **Thalès Communication and Security**, **PSA Peugeot-Citroën**, **DCNS**, **Bull-AMESYS**...

2. Participation à la diffusion de la culture scientifique

- Conférences plénières dans le cadre de la formation doctorale European Center for Soft Computing, Medical Imaging Using Bio-inspired and Soft Computing (MIBISOC), Parme, Italie, 25 Février 2012 : M. Adel, "Statistical image processing techniques applied to medical images : application to mammographic and retinal images".
- Contribution aux écoles thématiques sur les communications optiques sur invitation du comité de pilotage de l'Action COST Opticwise, Février 2013, Octobre 2013, Avril 2014
- Special issue on Multidimensional Signal Processing and Applications, Guest Editors: Salah Bourennane, Julien Marot, Caroline Fossati, Ahmed Bouridane, and Klaus Spinnler, The Scientific World Journal), Article ID 365126, Hindawi, 2014.
- Special issue on Toward Smart World: Wireless Multimedia Sensor Network and its Application, Guest Editors: J.-Won An, S. Liu, M. J. D. Morales, S. Bournnane, Y. J. Seo, Multimedia Tools and Applications Journal- Springer, 2016
- Livre : Under Water Acoustics ed. By S. Bourennane, INTECH, ISBN 979-953-307-297-4, 2012
- Livre: Wirless Communication and Sensor Network, ed. by S. Bourennane, World Scientific, ISBN 978-981-3140-00-4, 2016
- Publication d'un tutoriel sur les systèmes de communication optiques en espace libre (FSO) et leurs applications (publication majeure de l'Action COST FP7 IC1101) : M.A. Khalighi, M. Uysal, "Survey on Free Space Optical Communication: A Communication Theory Perspective " IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol.16, no.8, pp.2231-2258, Nov. 2014

3. Brevets

- Dépolariseur spéculaires parfaits, Myriam ZERRAD & Claude AMRA, Brevet FR1454923, déposé le 30 mai 2014, en copropriété avec le CNES qui a fait l'objet, en 2 ans, de 2 R&T en vue de la valorisation et du financement d'une thèse.
- Dispositif de détection d'un état de la cornée de l'oeil et procédé associé, C. Amra, M. Zerrad, G. Soriano, Demande de brevet n° FR 1554727.

4. Contrats industriels et sur financement privé

- Contrat de collaboration avec PSA sur les aspects "Speckle et photonique pour l'automobile" (15k€, porteur : M. Zerrad)
- Contrat industriel avec la DCNS sur l'Etude des performances des systèmes de communication optique sous-marine (25 k€), 2013-2014
- Contrat avec le Fraunhofer Institut (Erlangen) : détection d'anomalies sur des surfaces métalliques par imagerie hyper-spectrale, 61 k€
- Contrat Analyse de signaux obtenus par le GPR GSSI pour la détection et suivi de canalisations, financé par l'entreprise Detect-réseaux : 10 k€, en 2012
- Contrat étude de l'apport de l'imagerie hyperspectrale pour l'analyse de coupes histologiques, financé par l'entreprise Galderma R&D : 10 k€, 2013
- Projet SCAN VISION : Scanner Corporel à ondes millimétriques pour les aéroports et autres lieux publics " de l'appel à projet FUI-AAP18, en partenariat avec Bull-AMESYS budget total 800k€ dont 120 000€ pour l'Institut Fresnel, 2014-2017.
- Plusieurs contrats avec la société Noveltis (budget total : 30 k€)
- Contrat d'accompagnement d'une thèse CIFRE avec THALES Communication and Security
- Etude pour de l'aide automatisée assistée par ordinateur de la maladie d'Alzheimer sur la base d'images de Tomographie par Emission de Positons avec la société Nicesoft-Segami

IMPLICATION DU THÈME DANS LA FORMATION PAR LA RECHERCHE

Les membres de ce thème sont fortement impliqués dans les formations à l'Ecole Centrale Marseille ou à l'AMU : responsables d'unités d'enseignements, animation des équipes pédagogiques, cours magistraux (niveau Master), ...

Au cours de ce quadriennal, nous avons recruté 35 doctorants (dont 19 étrangers) et 9 post-docs (dont 5 étrangers).

En particulier pour la formation par la recherche, on peut lister les actions suivantes :

1. Création, animation et gestion de l'ensemble des U.E. du Master mention "Physique," spécialité "Optique et Photonique, Signal et Image," (O.P.S.I.), parcours Signal Image.
2. Offre d'un module de formation en Traitement du Signal et des Images dans le cadre de la formation doctorale "Physique et Sciences de la Matière" (ED 352).
3. Mise en place d'une plateforme pour l'enseignement et les travaux pratiques en traitement du signal et des images et en télécommunication, pour les élèves ingénieurs de l'Ecole Centrale Marseille et du Master OPSI.
4. Accompagnement et encadrement des élèves de l'Ecole Centrale Marseille dans le cadre de leur formation d'ingénieur (stages de 2^e année et projets de fin d'étude).
5. Mise en place et coordination d'une filière R&D pour les élèves ingénieurs de l'Ecole Centrale Marseille.
6. Contribution aux écoles thématiques (pour doctorants de la CEE) sur les communications optiques sur invitation du comité de pilotage de l'Action COST Opticwise (Février 2013, Octobre 2013, Avril 2014).

STRATÉGIE ET PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES POUR LE FUTUR CONTRAT

L'aspect majeur de la politique scientifique de ce thème est de consolider la transversalité des recherches et leur ancrage dans les enjeux économiques et sociétaux actuels. Pour cela il faudra continuer à développer des recherches pertinentes et à soutenir les collaborations qui existent déjà avec différents grands organismes (ONERA, IFREMER, CNES, ...) et avec les entreprises par le biais de contrats industriels. Il existe de nombreuses autres opportunités telles que les projets ou programmes européens que ce thème souhaite développer.

Ce quadriennal a par ailleurs vu une forte augmentation des collaborations du thème *Traitement de l'Information et Ondes aléatoires* vers les trois autres thèmes du laboratoire. Ces collaborations vont être poursuivies et amplifiées dans les années à venir, avec notamment l'intégration prochaine d'une nouvelle équipe de praticiens hospitaliers. Des actions sur la co-conception des systèmes d'imagerie seront également conduites conjointement avec le thème *imagerie avancée - vivant*. Afin que l'augmentation de ces collaborations pluridisciplinaires reste une force et n'engendre pas à terme une dilution des activités en traitement de l'information, nous veillerons à conserver notre présence dans la communauté, à travers la participation à divers groupes de travail, GdR, conférences et revues dans nos domaines d'expertise.

Pour chacune des activités de ce thème, les principaux objectifs scientifiques pour les années à venir sont les suivants.

Pour les activités en **polarisation et cohérence optique**, un grand nombre de travaux théoriques restent à conduire. Ils concernent notamment l'interaction des ondes avec les milieux anisotropes désordonnés, les processus de repolarisation temporelle spontanée, l'influence de la chromaticité et l'extension à la luminescence et aux systèmes multicouches. Des travaux sur la cohérence des ondes partiellement polarisées tels que leurs propriétés d'irréversibilité ou d'anisotropie seront également poursuivis. Parallèlement, l'effort sur la métrologie ultime devra

être poursuivi pour accompagner ces développements, notamment pour les régimes volumiques intermédiaires où les méthodes de calcul exact n'apportent pas encore de réponse. Ces travaux trouvent naturellement des applications dans le vivant (animal et végétal), l'éclairage, la télédétection et la sécurité. Deux projets ANR ont été déposés en 2015/2016 pour étendre ces travaux au rayonnement thermique et à l'analyse des végétaux. Enfin, les interactions avec les partenaires socio-économiques initiées ces dernières années s'intensifieront. On citera en particulier, la création d'un axe "Speckle & Photonique pour l'automobile" porté par les acteurs de ce thème comme première action commune de l'Open Lab Automotive Motion Lab" réunissant PSA-Peugeot-Citroën, l'ISM et l'Institut Fresnel sur la période 2016-2021.

Dans l'activité **télécommunications et traitement d'antenne**, nous poursuivrons nos travaux sur la caractérisation de sources en prenant en compte les interactions entre objets, leurs propriétés physiques, ainsi que la complexité du milieu de propagation pour augmenter leur pouvoir de discrimination. Pour les systèmes de télécommunications, nous étendrons nos études au concept de la radio cognitive en ce qui concerne les systèmes radiofréquence, et poursuivrons nos recherches sur les réseaux LiFi en travaillant sur les systèmes multi-utilisateurs et sur les communications optiques sous-marines pour augmenter la portée et la robustesse de telles liaisons.

Les activités en **traitements et modèles pour la télédétection** s'orientent dans différentes directions. En imagerie hyperspectrale, la nouvelle génération de capteurs hyperspectraux nécessite des méthodes de traitement et d'analyse plus performantes pour atteindre les performances attendues en termes d'identification d'objets. Nos travaux sur le traitement du signal multidimensionnel appliqués à l'hyperspectral se poursuivront pour lever ces nouveaux verrous et pour la détection et la reconnaissance spatiale de cible. Des méthodes de détection de changements sur des séries temporelles sont également en cours de développement.

En télédétection océanique, nous sommes idéalement positionnés pour travailler sur les sujets à venir sur les interactions entre ondes radar ou radiométriques et surfaces de mer, notamment pour l'étude des forts états de mer ou pour l'étude de la section efficace en polarisation croisée. L'analyse hyperspectrale de zones côtières se prolonge avec le projet ASTRID HypFoM (DGA/ANR) dont nous sommes porteurs et qui réunit des acteurs de la recherche en océanographie et en traitement du signal. Ce projet vise à développer des méthodes de dé-mélange spécifiques au fond marin, à partir d'une analyse fine des transferts radiatifs et des interactions non-linéaires. Parallèlement, les travaux en imagerie optique sous-marine se poursuivent, l'objectif étant de concevoir à partir du simulateur d'image développé, de nouvelles techniques de traitement et de restauration d'images quantitatives, adaptées au milieu sous-marin profond.

En imagerie PolInSAR, les performances actuelles, le besoin d'enrichir les informations obtenues, ainsi que les contraintes de mises en œuvre à bord d'un satellite nécessitent de trouver de nouvelles stratégies d'estimation des caractéristiques de la végétation éclairée. L'approche qui sera poursuivie s'appuiera sur l'exploitation de configurations qui permettent d'obtenir une plus grande diversité de données en utilisant, par exemple, plus de deux antennes ou plusieurs fréquences d'émission.

Concernant les activités relevant du sous-thème **Éléments méthodologiques pour l'image et le signal multidimensionnel**, différents travaux avec un fort lien avec l'activité **Télécommunications et traitement d'antenne** sont en cours de développement. En particulier, de nouvelles méthodes de débruitage d'images multidimensionnelles seront développées, en définissant les directions principales estimées par segmentation comme nouveau système pour représenter l'information. De plus, dans le cas de l'imagerie médicale, nous poursuivrons le développement des méthodes liées à l'aide au diagnostic assisté par ordinateur sur le volet hyperspectral mais également en approfondissant les techniques de sélection/extraction d'attributs et de segmentation multidimensionnelle dans le cas d'images médicales multimodales (IRM, TEP,...). Parallèlement, les techniques de segmentation de contour à forte concavité seront étendues aux contours évolutifs dans un contexte dynamique.

Par ailleurs, suite aux travaux portant sur la segmentation d'images fortement bruitées par contours actifs polygonaux, le fait de disposer d'un algorithme de segmentation ultra-rapide et non supervisé ouvre d'importantes perspectives, cet algorithme pouvant servir d'outil élémentaire pour la conception de nouvelles techniques de traitement d'images. En particulier, des travaux sont en cours concernant la segmentation d'images multi-régions de très grande taille et la segmentation de données 3D volumiques fortement bruitées.

Liste des ingénieurs, chercheurs et enseignants-chercheurs

Mouloud ADEL, Marc ALLAIN, Claude AMRA, Nicolas BERTAUX, Salah BOURENNANE, Caroline FOSSATI, Thierry GAIDON, Frédéric GALLAND, Mireille GUILLAUME, Mohammad Ali KHALIGHI, Michel LEQUIME, Julien MAROT, Philippe REFREGIER, Hervé RIGNEAULT, Muriel ROCHE, Antoine ROUEFF, Gabriel SORIANO, Myriam ZERRAD

THEME 4 - IMAGERIE AVANCÉE ET VIVANT

Coordonnateurs : Sophie Brasselet et Hugues Giovannini

RÉALISATIONS

Les techniques d'imagerie évoluent constamment, du fait de la complexité grandissante des objets explorés et de leur environnement, mais également des exigences croissantes en termes de résolutions temporelle et spatiale. L'Institut Fresnel développe dans ce contexte une activité à la pointe des derniers développements, au niveau des concepts analytiques et numériques, et de l'instrumentation. Ce thème de recherche couvre l'optique, les rayons X et les micro-ondes, formant un substrat unique à des champs variés et inter-disciplinaires, et à des applications multiples. Ce thème est regroupé autour de trois activités:

- Instrumentation
- Reconstruction numérique
- Etude du Vivant

Ces activités couvrent des compétences en numérique/traitement des images (au sein de ce thème et en collaboration avec le thème " *traitement de l'information et ondes aléatoires* "), biologie, biomédical, science de la matière, optique, nanooptique (en lien avec le thème " *Nanophotonique et couches minces optiques* ") et micro-ondes. La richesse de ces interactions donne une forte valeur ajoutée aux développements issus des travaux de l'Institut Fresnel, qui couvrent largement les aspects fondamentaux et leurs applications dans divers domaines.

Les développements effectués dans la période 2011-2016, appliqués à l'imagerie en biologie, en biomédical, et au diagnostic de la matière, ont permis de renforcer progressivement les activités de l'Institut Fresnel dans l'étude du vivant. Sont en effet aujourd'hui adressées des questions ouvertes en biologie et en médecine par des membres du laboratoire appartenant à ces communautés, ou au travers de collaborations actives. Ce choix de mener conjointement des approches instrumentales et conceptuelles, au plus près des domaines applicatifs, a pu mener au transfert technologique de plusieurs méthodes et logiciels, ou encore au transfert d'instruments dans des laboratoires de biologie.

Ce thème regroupe 38 enseignant-chercheurs, chercheurs et ingénieurs. Sur la période 2011-2016, il a généré 169 publications dans des revues internationales à comité de lecture, 50 conférences invités nationales et internationales et 13 brevets.

PRODUCTION SCIENTIFIQUE

1. Instrumentation

L'Institut Fresnel a concrétisé ces cinq dernières années d'importants développements instrumentaux, correspondant à différentes échelles d'applications: (1) démonstrations de méthodologies originales pouvant mener à de nouvelles approches en imagerie ou de diagnostic, (2) preuves de principe en lien avec des applications bien identifiées, (3) transferts d'instruments nouveaux vers des domaines collaboratifs variés (biologie, science des matériaux). L'objectif de ces développements est d'offrir aux communautés scientifiques complémentaires des approches conceptuelles et technologiques nouvelles, couvrant des champs non explorés, en les rendant à terme accessibles. Quelques-unes des techniques décrites ici sont issues de l'Institut Fresnel et sont aujourd'hui développées dans d'autres laboratoires ; d'autres font l'objet de séjours d'utilisateurs biologistes par exemple pour des tests de faisabilité.

Techniques de microscopie optique

- Microscopie ultra-résolue

L'utilisation de structures photoniques permet de contrôler les grandes fréquences spatiales du champ électromagnétique. En se basant sur ce principe, un premier travail a été réalisé en augmentant significativement la résolution suivant l'axe optique [Moa-1, Moa-2] : le microscope ISO (pour isotrope) utilise un modulateur de lumière et un miroir permettant de générer un faisceau réfléchi interférant avec le faisceau incident suivant l'axe optique. Ce concept a été étendu à la conjugaison de phase optique [Jan-1]. Un autre axe consiste à travailler dans le champ proche de structures diffractives sièges de champs optiques contenant de grandes fréquences spatiales. Nous avons ainsi pu réaliser une illumination structurée avec une résolution sub-longueur d'onde [Gir-1, Cat-1]. Ce domaine

- Microscopie de phase quantitative

- Microscopie optique non-linéaire et Raman cohérente

The diagram illustrates the experimental setup for CARS microscopy. It features two signal OPOs (Signal OPO1 + 1064 nm and Signal OPO2) that pump a CARS process in a sample. The scattered light is collected by a microscope and detected by a spectrometer. The setup also includes a delay stage and a 50/50 beam splitter. The inset shows the endoscope configuration with a fiber optic cable and a camera.

- **Microscopie optique résolue en polarisation**

- **Fibres optiques non linéaires pour la microscopie multiphotonique**

76

d'impulsions ultra-courtes. Nos travaux ont exploité ces possibilités pour la microscopie et la spectroscopie non linéaires, par compression spectrale d'impulsions laser pour l'imagerie Raman stimulé [And-1, Fat-1], ou encore par génération de solitons pour générer des longueurs d'ondes accordables [And-2, Sai-1, Sai-2]. Nous avons également proposé et démontré le 'façonnage d'impulsions non linéaires' associant un façonneur d'impulsion et une fibre optique non linéaire [And-3, And-4], mettant en évidence des super continuums cohérents ou encore des effets d'anomalie de phase dans la compression spectrale d'impulsions fs [And-5].

- Endoscopes et sondes fibrées pour la spectroscopie et la microscopie non linéaire

Nous cherchons aujourd'hui à pallier les limitations en profondeur de la microscopie optique en développant des systèmes fibrés permettant de réaliser (1) une imagerie non linéaire en bout de fibre et (2) une spectroscopie en bout d'une sonde fibrée. En collaboration avec le MPI Erlangen et l'IRCICA Lille nous avons développé des fibres creuses qui présentent un spectre de transmission très large avec lesquelles nous avons pu réaliser de la spectroscopie Raman [Ghe-4] mais aussi de la spectroscopie de corrélation de fluorescence [Ghe-2] en bénéficiant de signaux parasites très faibles (auto-fluorescence, effets non linéaires). Nous développons également des endoscopes non linéaires basés sur ces fibres [Bru-2] utilisant une microbille encastrée en bout de fibre pour focaliser fortement le faisceau [Ghe-3]. Une autre technique d'imagerie " sans lentille " exploite la mise en forme de front d'onde par miroir déformable en amont d'un bundle de fibres optiques monomodes [And-2, And-3, And-1] (Figure 1). Ces avancées positionnent l'Institut Fresnel parmi les laboratoires compétitifs dans le domaine de l'endoscopie non-linéaire.

Instrumentation et caractérisation en hyperfréquence

Nos activités en instrumentation hyperfréquence ont porté sur l'amélioration des performances de mesures de champs électromagnétiques en hyperfréquence. Nous sommes maintenant à même de mesurer le diagramme de diffraction de structures passives tri-dimensionnelles de petites dimensions devant la longueur d'onde, donc de faible pouvoir diffractant. Nous avons également mis au point une méthodologie pour estimer la permittivité de matériaux homogènes en exploitant ces phénomènes de diffraction en champ lointain [Eyr-1], utilisant la chambre anéchoïque à positionneurs sphériques mise à notre disposition par le Centre Commun de Ressources en Microondes (CCRM). En parallèle, dans la chambre anéchoïque à positionneurs plans construite à l'Institut Fresnel, nous nous focalisons sur des mesures en zone de Fresnel. Dans une telle configuration, la prise en compte du diagramme de rayonnement des antennes est primordiale, ce qui a nécessité d'incorporer cette information dans nos procédures de calibrage [Nou-1]. Ce système est actuellement mis à profit pour imager des cibles faiblement enfouies dans le sol [Nou-2].

En partenariat fort avec le CETHIL (UMR 5008) et l'Université de l'UTAH, nous développons également un dispositif de mesure de l'interaction entre des ondes évanescentes et un échantillon [Vai-1]. L'instrument permet de mesurer en champ proche et en champ lointain l'amplitude et la phase de champs électromagnétiques micro-ondes diffusés par diverses structures [Sho-1], et ainsi d'améliorer le couplage de l'énergie dans l'objet étudié ou de détecter des défauts plus petits à fréquence élevée [Vai-1]. Un premier prototype a déjà permis de détecter des objets d'un dixième de longueur d'onde.

Nous développons enfin depuis des années des techniques instrumentales utilisant la propagation guidée en lignes coaxiales pour la détermination des paramètres électromagnétiques dans le domaine spectral des microondes de matériaux en tous genres. Certains de ces développements sont de plus en plus exploités dans le domaine industriel sous la terminologie EpsiMu® [Sab-2]. Les applications actuelles sont multiples [Geo-1]. Citons entre autres l'électronique avec la caractérisation d'échantillons de Silicium utilisés en photovoltaïque, le génie civil avec la caractérisation de ciments et bétons en milieux hostiles (coll. IFFSTAR, ANDRA) [Bor-1] ou la mesure d'humidité dans des matériaux granulaires [Sab-1], l'aéronautique avec la caractérisation de supports souples utilisés dans les antennes compactes et déployables.

Autres développements en instrumentation

Notre intérêt pour la spectroscopie de molécules fluorescentes nous a amenés à développer un système d'analyse parallèle en spectroscopie de corrélation de fluorescence utilisant des réseaux de microbilles diélectriques qui permettent de réaliser une multitude de faisceaux focalisés [Ghe-4]. Nous avons également utilisé la saturation de fluorescence sous illumination périodique pour pouvoir séparer intensité et nombre de molécules présentes dans des expériences en cuvettes [Hos-1].

Nos études en interaction lumière matière sous fort flux nous amènent à développer des techniques spécifiques pour observer les déformations et les endommagements dans les composants optiques. Nous avons pu ainsi développer, en collaboration avec le laser Research Center de Vilnius (Lituanie), un banc pompe-sonde original permettant d'observer la création des dommages laser sous excitation fs dans des couches d'oxydes métalliques [Sia-1]. Nous avons pu également utiliser l'interférométrie de speckle pour observer des déformations dans des barreaux de combustibles nucléaires en partenariat avec le CEA [Vau-1, Fab-1].

2. Reconstruction numérique

Parmi les techniques d'imagerie actuellement disponibles ou en cours de développement, certaines d'entre elles nécessitent la mise en place de procédures de reconstruction numériques de l'objet sondé. Cela s'entend au sens où les données brutes, fournies par le dispositif d'acquisition, ne permettent pas d'imager directement et/ou de quantifier les paramètres d'intérêt qui caractérisent la zone sondée. L'information contenue dans les données doit alors être extraite à l'aide d'une procédure numérique basée sur deux éléments principaux : un modèle direct capable de relier l'objet aux données issues de la mesure, et un algorithme d'inversion permettant de reconstruire l'objet à partir de ces données. Intrinsèquement quantitatives et tridimensionnelles, ces méthodes d'imagerie nécessitent une adéquation entre modèles d'interaction onde/matière et stratégies numériques d'inversion, cette démarche étant la seule qui permette une maîtrise des coûts de calcul numérique et un contrôle de l'amplification des erreurs (de mesure ou de modélisation) dans la solution finale. Lorsque le milieu sondé est très complexe, le diagnostic est possible au-delà de l'imagerie, par extraction des propriétés physiques d'intérêt via une analyse multi-échelle.

Cette approche a été appliquée avec succès ces cinq dernières années, dans différents domaines d'imagerie décrits ici. Le savoir-faire important accumulé à l'Institut Fresnel permet aujourd'hui d'envisager des solutions numériques dans des champs très divers, voire de faire émerger de nouveaux concepts d'imagerie comme c'est le cas de quelques-unes des approches d'imagerie super-résolutive par exemple.

Microscopie tomographique diffractive optique

En tomographie optique le signal mesuré est le champ diffracté en phase et en amplitude, qui permet de reconstruire soit la carte d'indice de réfraction en 3D d'un objet volumique [Mai-1, God-1, Zha-1, Rua-1, Zha-3], soit le profil de hauteur d'un objet surfacique [Arh-1, Arh-2, Arh-3]. Cette approche a permis d'accéder à de nouvelles configurations d'échantillon moins accessibles par microscopie traditionnelle (déposé sur substrat, fortement diffractant, avec des pentes de rugosité importantes...), et d'améliorer la résolution spatiale d'au moins un facteur deux.

La tomographie micro-ondes

La tomographie micro-ondes, basée sur le même principe [Bel-1, Mud-1], a été appliquée à la reconstruction d'objets enfouis. Les travaux ont en particulier permis de diminuer l'impact d'un environnement bruyant autour des objets sur la qualité des reconstructions, par des techniques basées sur le retournement temporel ou la diversité fréquentielle [Sen-2]. La forme du diagramme de rayonnement des antennes [Nou-1] ainsi que la polarisation [Eyr-1, Eyr-3] ont également été introduites dans les modèles et leurs répercussions sur la qualité des images reconstruites ont été analysées, dans des configurations complètes ou en aspect limité, en se basant sur des mesures effectuées en chambres anéchoïques. Ces méthodes ont été appliquées sur des objets fixes complexes [Zha-1, Eyr-2] ou sur des structures pouvant évoluer en temps [Zha-4].

La tomographie photo-acoustique quantitative

Le signal mesuré est la pression acoustique issue des micro-dilatations produites par effet photo-thermique. Ce signal est porteur d'informations sur les propriétés optiques (absorption) et acoustiques du milieu. Les milieux étudiés sont ici des tissus biologiques (sein, muscles...), sondés dans le rouge-proche infrarouge (fenêtre thérapeutique), où un certain nombre de constituants élémentaires (hémoglobines, mélanine, graisses...) présentent des signatures optiques spécifiques. Un protocole d'illuminations multiples a été développé permettant de reconstruire quantitativement la distribution spatiale des coefficients d'absorption et de diffusion du milieu, de manière totalement découplée [Nin-1]. Par ailleurs, les travaux en cours portent également sur la reconstruction des propriétés acoustiques du milieu et sur l'étude du phénomène dans d'autres gammes de longueurs d'onde.

La microscopie de fluorescence à illumination structurée

Le signal optique mesuré est dans ce cas l'intensité émise par des fluorophores servant de marqueurs dans l'objet d'intérêt, lorsque celui-ci est éclairé par des illuminations structurées spatialement et bien calibrées, afin d'accroître la résolution. Contrairement aux méthodes classiques, les procédures d'inversion numérique mises au point permettent non seulement de reconstruire la densité de fluorophores, mais aussi les figures d'illumination. La technique devient ainsi insensible aux perturbations expérimentales de l'éclairage [Ayu-1], induites par des imprécisions du montage ou par l'échantillon lui-même. Elle reste même applicable avec des illuminations structurées aléatoirement (speckle) et donc totalement inconnues, générées de manière bien plus simple [Mud-2].

L'imagerie X cohérente

Dans le domaine de longueurs d'onde X, les optiques sont faiblement focalisantes. L'imagerie par inversion permet non seulement d'atteindre des résolutions spatiales inférieures à la limite de diffraction mais également d'obtenir des images quantitatives de l'objet, où l'information reconstruite est reliée aux propriétés physiques des matériaux (densité, déformations cristallines, cohérence, etc ...). La ptychographie de Bragg, que nous avons démontrée [God-1, God-2, God-3, Mas-1], permet l'imagerie 3D des propriétés cristallines de matériaux nanostructurés (Figure 2). Elle est aujourd'hui implémentée sur de nombreuses lignes de lumière en synchrotron afin de répondre aux problématiques rencontrées en sciences des matériaux [Ber-2, Cha-1, Hru-1].

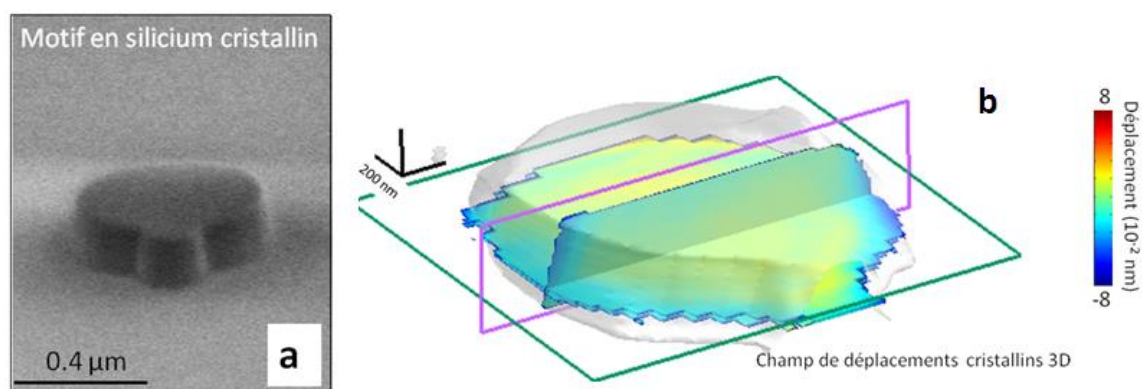


Figure 2: Imagerie par diffraction X cohérente (ptychographie de Bragg) d'un champ de déplacement atomique dans une structure cristalline modèle. (a) l'objet modèle, un plot de silicium cristallin, imagée par microscopie électronique à balayage. (b) reconstruction 3D du champ de déplacements cristallins.

Caractérisation multiéchelle

Les développements en imagerie et sondage bénéficient fortement de développements conjoints développés dans le thème " *Traitement de l'information et ondes aléatoires* ". La mesure de la diffusion angulaire haute résolution et grande dynamique permet notamment d'extraire des propriétés de structure en surface ou volume. Nous avons utilisé ce principe pour l'étude du colmatage de membranes pour la filtration de l'eau [Way-1]. La confrontation avec des techniques de microscopie permet de différencier les divers effets de colmatage [Way-1, Wu-1].

3. Etude du vivant

Les stratégies en instrumentation et traitement des images développées à l'Institut Fresnel se rapprochent progressivement des problématiques propres à l'imagerie et à l'étude du vivant. La maturation de certaines méthodes évoquées plus haut permet notamment d'apporter des moyens d'études nouveaux d'échantillons biologiques depuis l'échelle moléculaire jusqu'au petit animal, mais également pour des applications biomédicales. Les collaborations mises en place, récemment ou de longue date avec biologistes et médecins, l'accueil de chercheurs et ingénieurs en biologie et biomédical, permettent désormais à l'Institut Fresnel de se positionner sur des questions relevant purement de ces domaines, avec une force supplémentaire qui est l'accès à des instruments uniques et dédiés. A ces instruments viennent s'ajouter des approches uniques en traitement du signal et traitement d'image, en collaboration avec le thème " *Traitement de l'information et ondes aléatoires* ", qui renforcent considérablement leur applicabilité.

Imagerie des tissus

- Imagerie non-linéaire dans les tissus biologiques

L'institut Fresnel développe des stratégies permettant de surmonter les défis de l'imagerie optique dans les tissus biologiques, notamment posés par la diffusion de la lumière. Les interactions optiques non-linéaires (voir plus haut) permettent de répondre en partie à cette problématique en générant des signaux dans les milieux biologiques sans marquage fluorescent. Ces méthodes sont aujourd'hui appliqués à des problèmes biologiques, mais également relevant de défis industriels en cosmétique et biomédical. Il a été possible notamment d'imager des modifications morphologiques du collagène dans des tissus murins [Ait-1], les liaisons moléculaires lipidiques dans les couches de membrane cellulaires de myéline autour des axones dans la moelle épinière de souris (Figure 3), et d'évaluer la pénétration de substances chimiques/cosmétiques dans la peau [Chen-1, Chen-2]. Ces travaux ouvrent la voie à de nouvelles approches d'imagerie pour les biologistes, qui renforcent aujourd'hui leurs collaborations avec l'Institut

Fresnel sur ces sujets, par exemple avec INT (étude de la myéline dans la moelle épinière de souris) et INMED (étude de processus neuronaux dans le cortex de souris). Ces techniques de microscopie s'enrichissent de plus de la possibilité de résoudre en polarisation les signaux, permettant de remonter à des informations d'organisation moléculaire [Ait-1], qui pourraient à terme servir de diagnostic précoce de pathologies neurodégénératives. Enfin les techniques d'endoscopie (voir plus haut) permettent aujourd'hui une imagerie directe des tissus par contrastes optiques non-linéaires.

- Imagerie des tissus par OCT

Ce diagnostic optique consiste à détecter une modification des propriétés optiques liées à une pathologie. L'objectif actuel est de détecter ces modifications le plus précocement et le plus finement possible afin d'intervenir au plus vite pour le traitement ou de suivre au plus près l'évolution de la pathologie. L'institut Fresnel développe un protocole de diagnostic basé sur l'analyse conjointe des propriétés angulaires de diffusion et l'imagerie par tomographie de cohérence optique (OCT). Ce protocole est actuellement appliqué à l'étude des pathologies cornéennes [Cas-1] et les problématiques d'hydratation de la peau liées à la protection solaire. Le laboratoire a développé un dispositif de tomographie optique plein champ qui permet de visualiser les modifications de la structure du tissu à une échelle micrométrique dans les trois directions de l'espace. Par ailleurs, l'imagerie OCT apporte une cartographie des propriétés optiques utile pour les simulations de propriétés de diffusion des tissus. Cette étude a porté sur l'étude et le suivi de l'œdème cornéen [Cas-1] (Figure 3).

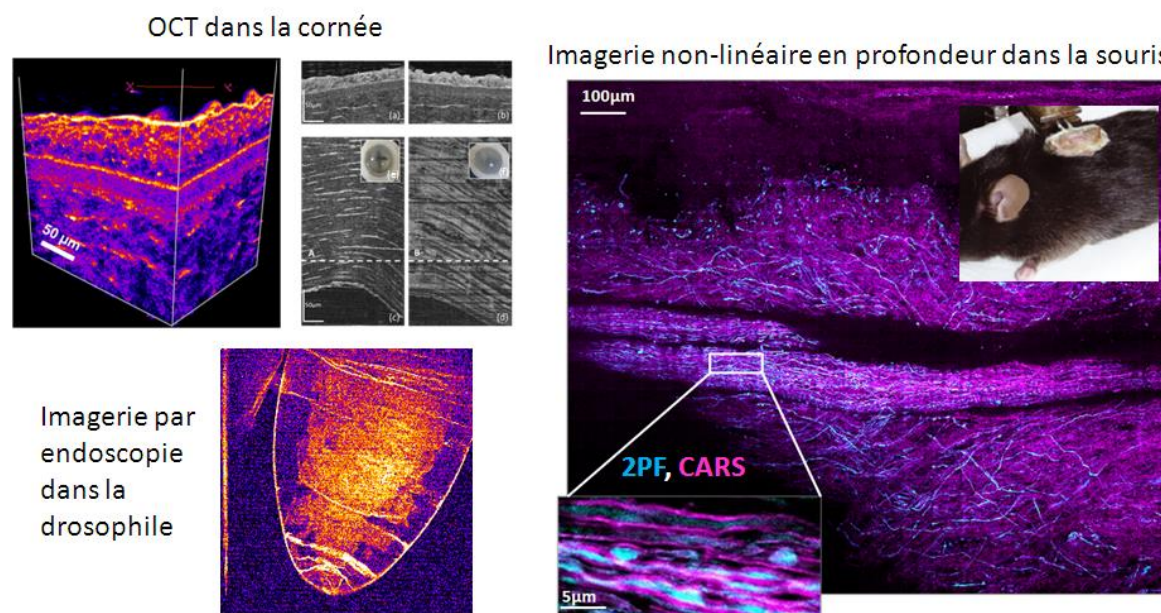


Figure 3. Imagerie sans marquage dans les tissus : OCT dans un greffon de cornée humaine : image 3D (à gauche), coupes d'un même greffon de cornée à différents degré d'œdème, et comparaison avec les photographies macroscopiques illustrant le degré de transparence; Imagerie CARS (magenta) et fluorescence à deux photons (2PF, bleu) dans des neurones de la moelle épinière de souris (la 2PF provient d'une protéine fluorescente exprimée directement par la souris, collaboration INT) ; Imagerie par endoscopie (ici 2PF dans un embryon de drosophile marqué GFP).

- Imagerie IRM haut champ magnétique

Enfin, une activité en lien avec le thème " *Electromagnétisme et métamatériaux* " est en pleine émergence autour de l'amélioration des conditions d'image en IRM. L'objectif d'introduire des IRM très haut champ magnétique (UHF > 7T) en clinique est de fournir une meilleure résolution spatiale que celle obtenue avec leurs homologues bas champ, tout en conservant des temps d'acquisition raisonnables. Cependant, avec l'augmentation du champ magnétique principal, la longueur d'onde du champ radiofréquence à la fréquence de résonance (fréquence de Larmor) devient plus petite que la dimension du volume à imager ayant pour conséquence une illumination très hétérogène de la région anatomique choisie. Les images montrent alors des vides de signal empêchant leur utilisation en diagnostic. Ainsi, il est nécessaire de repenser les émetteurs/récepteurs RF existants pour les UHF. L'objectif principal de cette thématique est de proposer une solution fondée sur la passivation de champs (passive shimming) grâce à des résonateurs localisés à base de métamatériaux [Jou-1]. Ce dispositif, basé sur des concepts ayant fait l'objet de brevets [Abd-1, Geo-1], permettra d'optimiser le rapport signal sur bruit (SNR) et d'homogénéiser le champ RF transmis au patient.

Imagerie des structures biologiques à l'échelle cellulaire

- Imagerie polarisée dans les bio-filaments

L'apport d'une détection polarisée à la microscopie de fluorescence (voir plus haut) a permis d'imager, avec la résolution d'un microscope confocal (~200 nm), l'ordre orientationnel moléculaire dans divers échantillons biologiques : membranes cellulaires, filaments du cytosquelette cellulaire, agrégats de protéines [Dub-4, Kre-1, Kre-2, Mav-1]. Ces résultats ont par exemple permis de confirmer, in vivo, le rôle structurant des filaments de septine dans l'architecture des filaments d'actine dans des embryons de drosophile [Mav-1]. Cette méthodologie originale permet aujourd'hui d'apporter une fonctionnalité nouvelle aux systèmes de microscopie habituellement utilisés par les biologistes.

- Imagerie aux échelles nanométriques

Nous développons depuis quelques années des méthodologies de traitement du signal adaptées à la détection et au suivi de molécules uniques pour des applications en imagerie pour la biologie. Ces méthodes, développées en collaboration étroite avec le Centre d'Immunologie de Marseille Luminy (CIML), ont la particularité de pouvoir détecter et localiser des molécules uniques en environnement très bruité (faible rapport signal à bruit) et de forte densité moléculaire (basé sur le logiciel multiple-target tracing (MTT)). Une licence logicielle est issue de ces développements. MTT a notamment permis dernièrement de mettre en évidence la diversité de comportements de diffusions moléculaires dans des membranes biologiques [Rou-1]. Ces approches ont été mises à profit récemment pour le développement d'un nouveau logiciel de mesure quantitative de populations cellulaires (Methods for Automated and Accurate Analysis of Cell Signals (MAAACS)) [Sal-1]. Ce développement a permis de quantifier la densité de calcium dans une population hétérogène de cellules immunitaires individuelles.

Ces méthodes de super-résolution par localisation moléculaire ont été étendues récemment à une modalité d'imagerie polarisée afin d'apporter, à l'échelle de la molécule unique, une information d'organisation orientationnelle des structures imagées [Val-1]. Cette approche innovante permet aujourd'hui de remonter à l'information de fluctuations orientationnelles des molécules et donc de quantifier le désordre structural de bio-molécules d'intérêt.

- Corrélation de signaux de fluorescence

Les méthodes de corrélation de fluorescence (FCS) à rayon de focalisation variable sont bien maîtrisées à l'Institut Fresnel [Fav-1], et continuent à donner des résultats nouveaux en biologie, en collaboration avec le CIML, pour mieux comprendre l'architecture membranaire [Bil-1]. La FCS fait encore l'objet de développements, et a été mise à profit pour mesurer, dans des conditions de faible signal à bruit, des informations nouvelles sur les temps de diffusion de complexes de protéines [Mop-1, Mop-2].

Imagerie quantitative de phase et de température en milieu cellulaire

La microscopie quantitative de phase par mesure de front d'onde est actuellement étendue à des applications biologiques ciblées [Bon-1, Mon-1]: mesure de la masse sèche de cellules, tomographie de tissus, mesure de la biréfringence de structures assemblées bio-moléculaires comme le collagène de la matrice extra-cellulaire. Cette microscopie a récemment conduit à une nouvelle méthodologie de mesure locale (à l'échelle de la diffraction) de la température photo-induite par des nanostructures plasmoniques [Baf-1, Baf-2, Baf-3, Don-1, Zhu-1]. Ces nanostructures se comportent comme des sources locales de chaleur induisant une modification d'indice du milieu environnant, qui peut être considéré comme un objet de phase dont la caractérisation permet de remonter à la densité de puissance locale, puis à la température. L'utilisation d'ensembles structurés de nanoparticules permet même de façonner spatialement la distribution de température (température constante sur une surface donnée, gradient constant, ...) de façon à contrôler ou perturber certains mécanismes cellulaires.

Nouvelles sondes moléculaires et inorganiques pour l'imagerie biologique

- Sondes fluorescentes

Des collaborations actives avec des chimistes (en particulier ENS Lyon) ont permis de mettre en place une nouvelle stratégie de développement de sondes fluorescentes pour les cellules (milieu intracellulaire et membrane plasmique) et les tissus (vaisseaux sanguins). Ces sondes fluorescentes sont basées sur des couplages ligands-lanthanides, qui permettent une excitation dans le proche infra-rouge (et donc à deux photons, à 700 - 800 nm) et une détection également dans le proche infra-rouge (700 nm à 980 nm) [Dal-1, Lap-1, Lap-2, Mau-1, Ren-1]. L'imagerie NIR-NIR est développée à l'Institut Fresnel à partir des microscopes non-linéaires existants, et a permis de démontrer la fonctionnalité de ces nouvelles molécules pour la biophotonique, ce qui représente une avancée importante dans le domaine du développement des sondes.

- Sondes non-linéaires

De nouveaux types de nanoparticules ont été développés en collaboration avec des chimistes des cristaux et nanoparticules (Institut Néel Grenoble, Ecole Polytechnique, Université Zurich) [Phi-1, Phi-2], dont les propriétés optiques sont basées sur les contrastes optiques non-linéaires cohérents. Ces particules représentent des objets intéressants pour l'imagerie en biologie sans photoblanchiment (ce qui représente encore une limite en fluorescence), mais également pour la physique. En effet ces nano-émetteurs cohérents sont des sondes idéales pour les processus optiques dans les milieux diffusants par exemples, puisqu'ils peuvent constituer des références locales qui permettent de quantifier la qualité d'une focalisation optique (et de son optimisation), et de la polarisation qui lui est associée.

RAYONNEMENT ET ATTRACTIVITÉ ACADÉMIQUES

1. Participation à des réseaux scientifiques, contrats, conférences invitées

Membre actif de réseaux Européens : réseaux COST (coordinateur national pour les réseaux 'MicroCARS' (2006 - 2011) <http://www.microcars.portal.chalmers.se/>, 'MicroCoR' (2011 - 2016) http://www.cost.esf.org/domains_actions/mpns/Actions/MP1102, 'TD1301 Accelerating the Technological, Clinical and Commercialisation Progress in the Area of Medical Microwave Imaging', 'Raman4Clinics' (2015-) <https://www.raman4clinics.eu/>, 'TU1208 Civil engineering applications of ground penetrating radar', et du groupe de recherche Européen 'Photonics4brain'.

Membre actif de nombreux réseaux nationaux : GDR Ondes (animation du groupe thématique "Imagerie dans les milieux complexes et biologiques", recensement des chambres anéchoïques françaises (action jointe INSIS/GdR ondes), animation d'un groupe de travail sur les incertitudes de mesure en chambre anéchoïque, créateur du Réseau des Utilisateurs de Chambres Anéchoïques Hyperfréquence (RUCH) action conjointe GdR/INSIS www.fresnel.fr/rca), membre du bureau scientifique du GDR Microscopie et Imagerie du Vivant ; participation au GdR européen Thermal nanosciences and nanoengineering ; participation au GDR Suie ; membre de comités de pilotage des réseaux de la mission pour l'Interdisciplinarité (FEMTO, ROP, RTmfm) ; membre de Projets infrastructure national investissement d'avenir : France Bio Imaging (<https://france-bioimaging.org/>) et France Life Imaging (<https://www.francelifeimaging.fr/>).

Implication dans 49 contrats publics (voir Annexe 7) sur la période 2011-2016 : 13 projets ANR (dont 3 projets Grand Emprunt), 2 projets Européens Erasmus Mundus, 1 projet Européen ITN FP7, 1 projet FUI-OSEO, 9 projets CNRS (DEFI, PEPS, ..), 7 projets SATT (dont maturation SATT et Institut Carnot) ; 7 projets Région et Ville de Marseille, 3 projets A*MIDEX, 3 projets CEA ; 3 projets INSERM et 2 projets fondation ARC et Canceropôle.

Recrutements : 1 recrutement IR CNRS en biologie (2014), 2 recrutements par mobilité CNRS (L. Le Goff CR1, M. Mavrikakis CR1, 2015), 58 post-doctorants et doctorants recrutés sur la période 2011-2016 ; **Accueil de 3 chercheurs invités :** Pr. Miguel Alonso, Univ Rochester USA (en 2015 et 2016 pour des périodes de 1 mois) ; Pr. S.O. Hruszkewycz, Argonne National Lab (2 séjours de 1 mois en 2014 et 2015) ; Pr. Yves Bérubé-Lauzière, U. de Shrebrooke, Québec, Canada (1 mois en 2014) ; une Chaire Professeur A*MIDEX (V. Markel).

50 conférences invités nationales et internationales ont été données, notamment dans les plus grandes conférences internationales en photonique (CLEO/EQEC, Photonic West, ...).

2. Organisation de manifestations scientifiques, participation à des expertises

Co-organisation de conférences internationales : "Frontiers in Optical Imaging" (FOI-2013) EOS Conference Topical meeting ; Session Thermal Biology du workshop organisé par le GdR européen (Paris 2015) ; Conférence Coherence (Saint Malo 2016), OSA conference on Imaging and Applied Optics (25 - 28 Jul 2016, Heidelberg), organisation du symposium Digital Holography & 3-D Imaging.

Co-organisation de conférences nationales : Journée BCP "Biologie, Chimie et Physique à Marseille" (2015, Marseille Institut Fresnel) ; Journées thématiques GDR Ondes : "Ondes et physique des milieux complexes" (2015, Paris), "Contrôle d'ondes pour la biologie" (2013 Marseille) ; "Super-résolution en optique, acoustique et électromagnétisme" (2012 Paris) ; "Imagerie multiondes et/ou non-linéaire" (2011 Paris), Comité local d'organisation du Colloque "Optique Marseille 2011" de la Société Française d'Optique (2011, Marseille).

Co-organisation de journées régionales/Université : Journée PR2I (Pôles de Recherche Interdisciplinaires et Intersectoriels Santé et Sciences de la Vie et Sciences & Technologies de l'Université d'Aix-Marseille) "Amélioration du contraste et de la résolution, nouveaux marqueurs" (9 Avril 2015)

Membres de comités scientifiques internationaux (Coherence 2014 (Evanston, US), CLEO/EQEC2011 Munich, CLEO/EQEC2013 Munich, Ptycho2013 Munich), European Conference on Biomedical Optics ECBO (SPIE/OSA)

Grande expérience d'expertise, dans des journaux scientifiques (Nature Photonics, Nature Communications, Nature Microbiology, Phys Rev Lett, Angewandte Chemie, Science Advances, Optical Soc America...), des agences étrangères (BBSR UK, MR UK, DFG, FWO, Marsten Fund N Zeeland, Research Council Canada, FOM Netherland, NOW Netherland, ANVUR, l'organisme d'évaluation de la recherche italienne, comité d'attribution du temps de faisceau ESRF, DOE(US), Fonds Québécois de la Recherche sur la Nature et les Technologies (FQRNT), Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC), UEFISCDI (analogue ANR en Roumanie) ...), des agences françaises (ANR, CEA, Fondation Pierre Gilles de Gennes, GDR ISIS (Appel à projets exploratoires 2016), Agence de la Biomédecine, AOR), les régions (Aquitaine, Rhône Alpes, Ile de France, PACA, Centre, Champagne Ardenne, Bourgogne, Ville de Paris, Ville de Marseille, Paris Sorbonne, Fondation Nanosciences Grenoble, Institut Polytechnique (Grenoble) ...), l'AERES, la Commission Européenne (ERC starting grant, Call FP7 Health).

3. Prix et distinctions

Médaille argent CNRS 2016 décernée à S. Brasselet

2ème Prix FIEEC de la recherche appliquée 2015 décerné à S. Monneret

IXCore foundation award 2011 décerné à H Rigneault

Prix de La Recherche Scientifique 2015 (1ère place) de l'AMDT (Association Méditerranéenne pour le Développement des Transplantations) décerné à G. Ho Wang Yin (doctorant)

2 prix de thèse de l'ED 352 (Physique et Science de la Matière) décernés à I. Voznyuk (2014), et P. Gasecka (2016)

INTERACTION AVEC L'ENVIRONNEMENT SOCIAL, ÉCONOMIQUE ET CULTUREL

1. Partenariats avec des acteurs socio-économique

24 contrats privés sur la période 2011-2016 sur des sujets d'études variées, notamment en microscopie de phase (PHASICS), microscopie Raman cohérente dans le diagnostic médicamenteux et cosmétique dans la peau (L'OREAL, GALDERMA, SANOFI AVENTIS), caractérisations électromagnétiques de matériaux (IFSTTAR, ANDRA, EDF, VEOLIA).

2 projets de maturation SATT Sud-Est (depuis 2015): endoscopie non linéaire, localisation de cible en milieu absorbant. Programme de **co-maturation avec l'Institut Paoli Calmette**: évaluation clinique des techniques d'endoscopie sans marquage pour l'imagerie in vivo oncologique

13 brevets et 1 licence logiciel, portant principalement sur de nouvelles méthodologies de sondage, d'imagerie IRM, de microscopie et d'endoscopie.

De nombreuses thèses (PHASICS, SUEZ, L'OREAL, BERTIN TECHNOLOGIES) et études (L'OREAL, GALDERMA, PixBio, PHASICS, Horus Pharma, Multiwave AG), ont été menées dans le cadre de collaborations industrielles, ou avec le CEA Cadarache, CEA-LETI, Lightnics.

2. Participation à la diffusion de la culture scientifique

Participation (Janvier-octobre 2015) au projet "Éclats de Lumière" (monté par un collectif pluridisciplinaire de laboratoires de la région PACA dans le cadre de l'Année Internationale de la Lumière) : article "de la lumière pour mieux voir l'œil", site Éclats de lumière, interview par OSU Pythéas, coordination d'un stand fête de la science 2015 "lumière sur le vivant et les nanosciences", participation au film "trace de Lumière" en juin 2015, participation à l'exposition mobile (réalisation de panneaux).

Article dans la **Lettre AMU 2012** (Université Aix Marseille) présentant le programme Europhotonics Erasmus Mundus Master et Doctorate,

Conférences grand public : Gap (Avril 2013, "Lumière sur le vivant"), Bibliothèque l'Alcazar ("Lumière sur le Vivant", 15 septembre 2015, "Les nouveaux yeux pour voir l'infiniment petit ou l'infiniment loin", 24 septembre 2015) ; Light for Health (L4H), ICFO, Barcelone "In vivo optical molecular imaging closer to clinical",

De nombreux **séminaires invités**, dans des laboratoires de communautés complémentaires (biologie, analyse d'image biomédicale...), comme par exemple "Tomographie PhotoAcoustique pour la Mammographie" (séminaire d'Analyse Appliquée du LATP, Marseille mars 2013), ou "Quand l'imagerie médicale traque les cancers" (Eurobiomed, Optitec, Juin 2013).

Animation en Ecole élémentaire (Marseille, 2015) : atelier sur la couleur, atelier d'observation à l'aide d'un sténopé lors de l'éclipse solaire partielle du 20 mars 2015.

Ouvrages : " Optical Imaging ", Chapitre 7, in Photon-based Medical Imagery, pp. 267-324, sous la direction de Hervé Fanet, Editions ISTE/Wiley, 2011 ; Monographie: J. Stangl, C. Mocuta, V. Chamard, D. Carbone. Nanobeam X-ray Scattering. Wiley VCH, 2013, 978-3-527-41077-4., 270 pages.

Diffusion des faits marquants : au niveau national via le CNRS (revue CNRS Le journal, site web de l'INSIS, site web de la DR12...) et l'université Aix Marseille : Mai 2016, Une imagerie en temps réel pour les vibrations moléculaires, <http://www.cnrs.fr/insis/recherche/actualites/2016/05/imagerie-molecules.htm>; Juillet 2015, Une localisation ultra-précise de nanoparticules pour améliorer la résolution des microscopes, <http://www.cnrs.fr/insis/recherche/actualites/2015/07/nanoparticules.htm>

IMPLICATION DU THÈME DANS LA FORMATION PAR LA RECHERCHE

33 doctorants ont soutenu leur thèse dans la période 2011-2016.

Coordination du programme Europhotonics Erasmus Mundus Joint Doctorate 2011-2018 (financement agence Européenne EACEA) ; Ce programme a permis de recruter 14 doctorants à l'Institut Fresnel depuis 2011, et de générer une vingtaine de projets de recherche commun avec les laboratoires de l'Universitat Politecnica Catalunya (UPC, Barcelone Espagne), l'Institut de Photonique ICFO (Barcelone Espagne), le LENS (Florence, Italie), et le Karlsruhe Institute of Technology (KIT, Allemagne).

Coordination du programme Europhotonics Erasmus Mundus Master 2011-2016 (financement agence Européenne EACEA) ; Coordination du programme **Erasmus Mundus Joint Master Degree POESII-Europhotonics (Erasmus+)** 2016-2019 (financement conjoint de l'agence Européenne EACEA et de la fondation A*Midex Investissements d'avenir). Ces programmes sont développés en collaboration avec UPC (Barcelone, Espagne) et KIT (Karlsruhe, Allemagne).

Création de trois unités d'enseignements en 2015 dans le master M2 POESII-Europhotonics en lien direct avec les axes de recherches développés dans le thème (biophotonique, spectroscopie moléculaire, formation des images). Ces UE sont pilotées par des Enseignants/Chercheurs du thème. Dans ce cadre, de nombreuses heures de cours et de TP (associés aux cursus AMU et Centrale Marseille) ont été délivrés.

Les Enseignants/Chercheurs du thème contribuent individuellement à la **formation bi-annuelle Mifobio** (Ecole en Microscopie Fonctionnelle en Biologie) (2012, 2014, 2016) où des modules de cours sont organisés, des cours et TP sont délivrés.

Formations CNRS : journée ANF "Imagerie vibrationnelle" (30 Juin -1er Juillet 2014, Institut Fresnel, Marseille), Optique pour les biologistes " 2007, 2008, 2010, 2011, 2014 (3 jours, Institut Fresnel) soutenue par le réseau RTMFM de la Mission pour l'Interdisciplinarité, Formation culture cellulaire animale pour des non biologistes (mai 2016, 2,5 jours).

Modules de formation doctorale 2011-2016 : 2 à 3 modules de 24h ont été enseignés chaque année depuis 2011 au sein de l'Institut Fresnel. Ceux-ci sont ouverts aux doctorants de l'Ecole Doctorale 352 " Physique et Sciences de la Matière ". Environ 10 intervenants (6 à 10 étudiants par module) pour des cours en Nanobiophotonique, Traitement du signal et des images, Electromagnétisme et modélisation.

Organisation d'écoles nationales : Ecole thématique Mifobio (330 participants) (2012, 2014, 2016) ; Ecole thématique des photons et des neurones 2012 ; École d'Automne de Mesures d'Antennes et de Diffraction (EAMAD) (2011 Rennes) (dans le cadre du GdR Ondes, 30 heures de cours et TP, 19 participants).

Organisation d'écoles internationales: 1st MicroCOR winter school on Chemical Imaging by Coherent Raman and nonlinear microscopy." (Centre de Physique des Houches, 2014) (70 participants), Europhotonics Spring School 2015 (Paderborn Allemagne) (110 participants) et 2014 (Porquerolles, France) (110 participants).

STRATÉGIE ET PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES POUR LE FUTUR CONTRAT

Le projet en "Imagerie avancée et vivant" est d'évoluer vers une interaction plus forte et systématique entre développement conceptuel, développement technique et traitement du signal et des images. Quelques exemples de résultats ont montré le succès important que peut apporter cette interaction, qui se verra encore plus valorisée dans le futur par les collaborations rapprochées avec les biologistes, la communauté du biomédical et les médecins, présents à l'Institut Fresnel. Ce couplage important permet également d'envisager des instruments ciblés issus de la co-conception (où modélisation, traitement et technologie évoluent de concert), ou encore de transférer vers l'industrie des concepts originaux, comme la possibilité d'optimiser des conditions d'imagerie en temps réel, ou d'évaluer une situation à des échelles multiples. Les directions générales des perspectives de ce thème sont décrites ici.

1. Nouvelles technologies

D'un point de vue technologique, des directions privilégiées ont été identifiées vers (1) le gain en résolution spatiale et temporelle des images, (2) leur caractère quantitatif pour le diagnostic et le sondage, (3) le gain en profondeur (dans les milieux diffusants) des diverses techniques d'imagerie et notamment in vivo. Dans ce sens des collaborations rapprochées sont engagées avec des industriels (matériaux), biologistes des neurosciences (INMED, INT pour l'imagerie dans la souris), du développement (IBDM et biologistes de l'Institut Fresnel) et des biominéraux. Ces directions nécessitent de faire progresser les méthodologies vers une utilisation plus optimisée de la mise en forme de fronts d'onde optiques (par exemple pour l'imagerie multi-modale non-linéaire in vivo dans la souris), de l'endoscopie (par exemple pour l'imagerie non-linéaire en situation clinique et sur des modèles de souris en neurosciences) et de l'OCT en présence de diffusion (par exemple pour l'imagerie de stades précoces des pathologies cornéennes in vivo).

L'optimisation des méthodes d'imagerie en cours de développement est également primordiale : utilisation d'illuminations aléatoires en imagerie optique super-résolutive dans les milieux complexes et extension à d'autres types de modalité (photo-acoustique, ...), fiabilité des mesures quantitatives en tomographies micro-ondes et photo-acoustique dans des environnements complexes où la diffusion diminue le nombre de degrés de liberté sur l'information obtenue (en introduisant des modalités modifiées de protocoles d'illumination/détection, ...). Il en est de même pour les méthodes d'inversion et de reconstruction, en optique et imagerie X cohérente, qui s'orientent vers une accélération des algorithmes d'inversion et la simplification des modalités de mesure.

2. Nouvelles méthodologies et nouveaux concepts

Les développements technologiques vont de pair avec la nécessité d'ouvrir certains domaines vers de nouvelles approches méthodologiques et conceptuelles. Un aspect important de ce domaine est d'accéder à diverses échelles (moléculaire, cellulaire, tissulaire,...): cette recherche a pour conséquence de développer les approches nécessaires pour savoir relier ces échelles et définir les grandeurs pertinentes (structurales, mécaniques, ...) qui les relient. En tomographie optique diffuse et imagerie des tissus biologiques, l'échelle macro/mésoscopique sera mieux résolue grâce au développement de nouvelles méthodes impliquant l'exploitation d'autres degrés de liberté (résolues angulairement et/ou en polarisation). Ces développements seront favorisés par l'accueil sur une Chaire AMIDEX du Prof. Markel (Université de Pennsylvanie), spécialiste des méthodes d'inversion de problèmes non-linéaires à grands volumes de données, avec notamment la mise en œuvre de la méthode originale DCTMC (data-compatible T-matrix completion) récemment développée. En microscopie de super-résolution polarisée, une évaluation de la méthode optimale de mesure d'orientations d'émetteurs uniques est encore nécessaire, couplant implémentation expérimentales et évaluation des estimateurs associés. Le lien entre comportement orientationnel des bio-molécules, propriétés structurales macro-moléculaires, et propriétés mécaniques de leurs assemblages à plus grande échelle, sera évalué et modélisé grâce à des approches de type biomécaniques décrites ci-dessous.

Une autre conséquence des méthodes complexes d'imagerie développées est la nécessité d'optimiser l'utilisation des données mesurées. Un travail important sera effectué (dans la continuité des premiers travaux collaboratifs entre instrumentalistes et chercheurs en traitement du signal) dans ce sens : l'optimisation des estimateurs, des conditions de mesure, sont aujourd'hui des éléments primordiaux à maîtriser, avec les outils théoriques appropriés, pour faire progresser nos approches instrumentales vers des utilisations fiables dans des conditions extrêmes (milieux complexes, haute dynamique, ...).

Une thématique forte se dégage notamment entre ce thème et le thème "*traitement de l'information et ondes aléatoires*", portant sur la co-conception des systèmes d'imagerie (avec de nombreux travaux sur la maîtrise de la

précision de l'information extraite des mesures, sur le développement de systèmes d'acquisition adaptatifs ou sur la prise en compte de l'adéquation algorithme-architecture).

3. Biologie, Biomécanique

Les applications des méthodes décrites plus haut sont largement orientées vers la biologie. L'imagerie X cohérente permet aujourd'hui d'adresser la compréhension des processus de biominéralisation, la thermoplasmonique permettra d'évaluer le contrôle directionnel de la croissance neuronale, le contrôle de la polymérisation de bio-polymères, ou encore le stress cellulaire. Enfin l'imagerie polarimétrique optique fournira une imagerie structurale dynamique dans de nombreux systèmes biologiques (architecture de la membrane cellulaire, des filaments du cytosquelette, des structures macromoléculaires in vitro comme les agrégats de protéines liées à des développements de pathologies neurodégénératives).

L'accueil en 2014 d'un ingénieur en biologie et en 2015 de deux chercheurs biologistes (L. Le Goff et M. Mavrikis, précédemment à IBDM Marseille) a permis de renforcer le lien direct avec des questions encore ouvertes de ce domaine. Le projet démarré porte plus spécifiquement sur l'étude des formes des cellules et des tissus au cours du développement animal. Afin d'aborder ces questions de morphogénèse, les études porteront sur des systèmes biomimétiques (in vitro), des cellules isolées ainsi que des tissus vivants (Drosophile). Plus précisément, seront abordés le lien entre l'organisation du cytosquelette (la "charpente" cellulaire) et la forme des cellules, la régulation de ces interactions au cours du développement, et les liens réciproques entre la mécanique et la croissance d'un tissu.

Cette activité rassemblera, au sein de l'Institut Fresnel, des expertises en biologie, en biomécanique, en instrumentation optique et en traitement du signal et des images, qui permettront d'explorer plusieurs axes très originaux grâce à cette convergence rare de compétences : (1) nouveaux outils moléculaires pour mesurer l'organisation dynamique des filaments du cytosquelette, notamment des filaments d'actine et de septine, dans des cellules et des tissus vivants en utilisant l'imagerie polarimétrique rapide ; (2) identification des mécanismes moléculaires qui régulent l'assemblage et l'organisation des filaments de septine (modifications posttraductionnelles, association avec les membranes cellulaires) in vivo en combinant des outils génétiques avec l'imagerie polarimétrique et la microscopie à corrélation de fluorescence (FCS) ; (3) étude des interactions entre les différents types de filaments du cytosquelette (actine et septine) et de leur interactions avec les membranes cellulaires au cours de la morphogénèse des cellules, notamment dans le contexte de la motilité et de la division cellulaire, en combinant des approches biochimiques et génétiques avec la microscopie à corrélation de fluorescence (FCS) et la microscopie de molécule unique ; (4) développement de nouvelles approches expérimentales (ablation laser) et computationnelles (inférence du stress et des déformations par analyse des contours cellulaires) permettant d'analyser la mécanique tissulaire ainsi que le comportement cellulaire au sein d'un tissu qui croît et se développe (mesures in vivo) ; (5) étude des voies de signalisations associées à la croissance et à la prolifération, et leur lien avec la mécanique ; (6) développement d'outils d'imagerie optimaux pour l'observation des tissus vivants sur de longues durées, en profondeur et de façon moins invasive.

4. Imagerie moléculaire pour le biomédical

Enfin, l'Institut Fresnel renforcera ses activités biomédicales par le rattachement d'une équipe de spécialistes en imagerie moléculaire issue de l'APHM et de CERIMED, regroupant médecins nucléaires, médecins cliniciens et physiciens (cf. annexe 8). Cette équipe s'intéresse à l'imagerie SPECT ou PET, utilisant des émissions radioactives gamma ou bêta révélés par la détection de simple photon ou de paires de photons. Ce radiomarquage diagnostique bénéficie d'une grande sensibilité (sous-picomolaire après introduction de quelques microgrammes de traceurs), sans perturber l'environnement à explorer. Cette imagerie est par ailleurs étendue au concept de théranostic. Initialement proposé pour un composé permettant de combiner dans une approche uniciste le diagnostic et le traitement de la maladie, il intègre aussi aujourd'hui la notion de biomarqueur, en particulier pour des couples de traceur et médicament compagnons dirigés vers une même cible physiopathologique pour le diagnostic et le traitement. Les théranostics seront ici développés et mis en œuvre dans la thématique des Neurosciences cliniques, des maladies inflammatoires/infectieuses et du cancer, avec une attention particulière pour leurs interfaces.

En interaction avec les autres composantes de l'Institut Fresnel, les développements méthodologiques associés à cette équipe concernent principalement l'évolution d'une imagerie moléculaire jusqu'ici mono-paramétrique (mesure mono-modalitaire de la captation maximale d'un radiotraceur unique administré en condition basale), vers une imagerie biomédicale multidimensionnelle, reposant sur l'extraction et l'intégration multi-variée de paramètres tenant compte de la multimodalité, de l'approche multi-traceurs, et des dimensions spatiales (hétérogénéités de texture) et temporelles. Cette dernière constitue une opportunité pour développer une imagerie moléculaire per-procédure caractérisant, en temps réel et en l'absence des limitations associées à l'IRM, les processus physiologiques ou pathologiques, par exemple pour imager les effets dynamiques de la neuro-modulation (magnétique transcutanée ou électrique profonde), ou bien pour imager des activations cérébrales nécessitant des paradigmes d'interactions

complexes, en particulier en réalité virtuelle ou augmentée, possiblement réalisés à distance de l'acquisition (à l'extérieur de l'instrument) en mettant à profit les caractéristiques pharmacocinétiques spécifiques des radiotraceurs. Les acquisitions dynamiques constituent également une opportunité pour développer et étudier la connectivité cérébrale métabolique, et étendre cette approche à d'autres biomarqueurs moléculaires que le glucose. L'amélioration de la résolution temporelle des acquisitions PET dynamiques sera principalement conduite en optimisant les protocoles d'administration des radiotraceurs, et en particulier la modélisation de l'administration continue, ainsi qu'en optimisant la reconstruction des données 4D en utilisant des fenêtres de recouvrement. Les collaborations méthodologiques concerneront enfin la reconstruction numérique, en particulier pour améliorer la résolution spatiale des images PET en modélisant le parcours du positon avant annihilation ; et pour améliorer le rapport signal sur bruit des images PET comptant peu de photons (acquisition dynamique ; injection faible dose pour dépistage et surveillance plus systématique, notamment en pédiatrie).

Liste des ingénieurs, chercheurs et enseignants-chercheurs

Redha ABDEDDAIM, Hassan AKHOUAYRI, Marc ALLAIN, Guillaume BAFFOU, Kamal BELKEBIR, Nicolas BERTAUX, Sophie BRASSELET, Virginie CHAMARD, Patrick CHAUMET, Anabela DA SILVA, Carole DEUMIE-RAVIOL, Julien DUBOISSET, Stefan ENOCH, Christelle EYRAUD, Patrick FERRAND, Laurent GALLAIS, Frédéric GALLAND, Jean-Michel GEFFRIN, Gaëlle GEORGES, Hugues GIOVANNINI, Loïc LE GOFF, Amélie LITMAN, Guillaume MAIRE, Manos MAVRAKIS, Serge MONNERET, Philippe REFREGIER, Hervé RIGNEAULT, Muriel ROCHE, Antoine ROUEFF, Pierre SABOUROUX, Nicolas SANDEAU, Julien SAVATIER, Anne SENTENAC, Laure SIOZADE, Gabriel SORIANO, Hervé TORTEL, Jérôme WENGER
