

LABORATOIRE DE PHOTONIQUE QUANTIQUE ET MOLECULAIRE

Rapport quadriennal 2005 – 2008
Bilan du Laboratoire

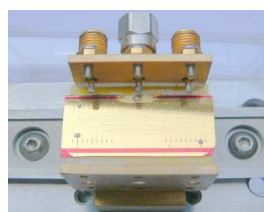
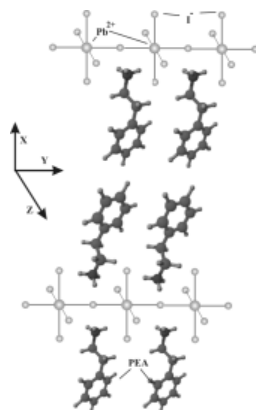
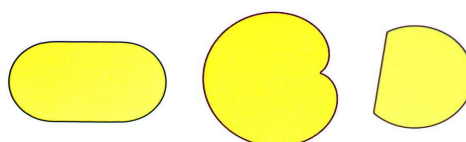
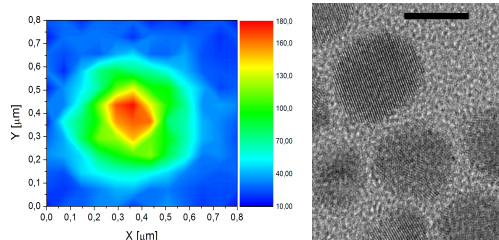
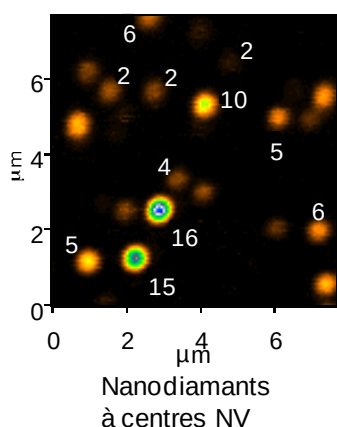


Table des Matières

Partie 1 : BILAN SCIENTIFIQUE 2005-2008	1
1 - 1 : Présentation générale	1
1 - 1 - 1 : Organisation de l'unité	1
1 - 1 - 2 : Résultats marquants	2
1 - 1 - 3 : Mouvements de personnels permanents	3
1 - 1 - 4 : Répartition des crédits en 2006 et 2007	4
1 - 1 - 5 : Organisation de congrès	4
1 - 2 : Bilan des équipes de recherche	5
1 - 2 - 1 : Composants et technologies pour la photonique	5
1 - 2 - 1 - 1 : Composants électro-optiques à base de polymères	5
1 - 2 - 1 - 2 : Composants à base de polymères pour la radio sur fibre	8
1 - 2 - 1 - 3 : Développement de technologies de « soft lithographie »	9
1 - 2 - 1 - 4 : Amplificateurs optiques pour les télécoms	9
1 - 2 - 1 - 5 : Microcavités laser	10
1 - 2 - 2 : Matériaux et nanostructures pour la photonique	13
1 - 2 - 2 - 1 : Ingénierie moléculaire pour la photonique	13
1 - 2 - 2 - 2 : Propriétés optiques de nanostructures hybrides	16
1 - 2 - 3 : Nano-photonique non linéaire et biophotonique	23
1 - 2 - 3 - 1 : Microscopie bi- photonique femtoseconde pour l'étude de micro-et nanostructures	23
1 - 2 - 3 - 2 : Développement de nouvelles techniques de microscopie	25
1 - 2 - 3 - 3 : Manipulation optique	26
1 - 2 - 3 - 4 : Etude de films moléculaires auto-organisés	27
1 - 2 - 3 - 5 : Vers l'étude des structures cellulaires	28
1 - 2 - 3 - 6 : Microscopie électro-optique et applications	28
1 - 2 - 3 : Nano-photonique quantique	29
1 - 2 - 4 - 1 : Tests fondamentaux de la mécanique quantique	29
1 - 2 - 4 - 2 : Cryptographie quantique	30
1 - 2 - 4 - 3 : Nanoparticules de diamant photoluminescentes pour le marquage en biologie	30
1 - 2 - 4 - 4 : Non linéarités optiques à l'échelle nanométrique	32
1 - 2 - 5 : Conclusion	34
Partie 2 : PRODUCTION SCIENTIFIQUE 2005-2008	35

Partie 3 : ENSEIGNEMENT ET FORMATION PAR LA RECHERCHE, INFORMATION ET CULTURE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE.....	56
Partie 4 : ACTION DE FORMATION PERMANENTE DES PERSONNELS	56
Partie 5 : HYGIENE ET SECURITE	56

Contractualisation vague D 2010-2013
Unité de recherche : dossier unique
LABORATOIRE DE PHOTONIQUE QUANTIQUE ET
MOLECULAIRE (UMR CNRS 8537)
Institut d'Alembert – ENS Cachan
BILAN
de l'activité de recherche et des résultats obtenus par l'unité

PARTIE 1 : BILAN SCIENTIFIQUE (2005 – 2008)

1 - 1 – Présentation générale

1 – 1 – 1 – Organisation de l'unité

Le LPQM a été créé au 1-1-98 par Joseph ZYSS (rattachement SPM/STIC de 98 à 2001 puis STIC/SPM de 2002 à 2005, et ST2I /MPPU depuis 2006). Il est une des quatre unités constituant l'IFR d'Alembert (IFR 121) créé au 1-1-2002.

La directrice du Laboratoire est Isabelle LEDOUX-RAK depuis le 1^{er} janvier 2006.

La direction est assistée par un Conseil de Laboratoire, dont les membres permanents sont Isabelle Ledoux-Rak, Jean-François Roch, Joseph Zyss, Jean-Sébastien Lauret, Frédéric Grosshans, Dominique Chauvat, Ginette Puyhaubert, Chi Thanh Nguyen (ACMO) plus un représentant des doctorants (actuellement Orestis Faklaris) et un représentant des post-doctorants et ATER.

Le Laboratoire est organisé en quatre équipes dont l'organigramme est représenté ci-dessous :

Equipes de Recherche (le nom des responsables d'équipe est souligné)

Composants et technologies pour la photonique

Membres permanents: Chi Thanh Nguyen (IR CNRS), Mélanie Lebental (MdC), Joseph Zyss (PU)

Matériaux et nanostructures pour la photonique

Membres permanents: Isabelle Ledoux-Rak (PU), Emmanuelle Deleporte (PU), Jean-Sébastien Lauret (MdC) Michel Dumont (DR émérite), Joseph Zyss (PU)

Nano-photonique nonlinéaire et bio-photonique

Membres permanents: Dominique Chauvat (MdC), Jacob Szeftel (IR CEA), Joseph Zyss (PU)

Nano-photonique quantique

Membres permanents: Jean-François Roch (PU), François Treussart (PU), Frédéric Grosshans (CR CNRS)

Secrétariat : Ginette PUYHAUBERT (SASU)

Responsable communication, séminaires et site web : Jean-Sébastien Lauret

Responsable documentation : Frédéric Grosshans

Comité Hygiène et Sécurité (ACMO) : Chi Thanh Nguyen (technologies salle blanche et chimie) et François Treussart (lasers, électronique et physique)

Secouriste : Ginette Puyhaubert

La salle blanche du LPQM est maintenant gérée par l'Institut d'Alembert, sous la responsabilité d'un ingénieur d'étude de l'ENS Cachan, Joseph Lautru, recruté en décembre 2006.

Par rapport à l'exercice précédent, il faut noter (et regretter) la disparition des services transversaux d'instrumentation laser et d'électronique, disparition due aux départs à la retraite de deux ingénieurs de recherche, Dominique Josse en juillet 2005 et André Clouqueur en février 2008, non remplacés à ce jour. L'absence de support dans ces deux domaines constitue un sérieux handicap pour le développement des activités de recherche du LPQM, particulièrement en ce qui concerne les équipes de nanophotonique Moléculaire et de Nanophotonique Quantique.

1 – 1 – 2 – Résultats marquants 2005-2008

1 – 1 – 2 – 1 : Résultats scientifiques

L'exercice 2005-2008 a été marqué par de nombreux résultats au sein de chacune des équipes, concrétisés par une centaine de publications dans des revues internationales à comité de lecture. Quelques exemples sont donnés ci-dessous :

Composants et technologies :

- Conception et réalisation de modulateurs électro-optiques à structure résonante (miroirs de Bragg)
- Amélioration de la tension demi-onde et de la bande passante d'un modulateur de phase électro-optique à base de polymère fonctionnalisé DR1.
- Microcavités laser à base de polymères : directionnalité de l'émission, études théoriques et expérimentales des orbites pour diverses formes de cavité, fonctionnant en particulier en régime chaotique

Matériaux et nanostructures

- Mise en évidence d'un très fort contraste de nonlinéarité moléculaire ($\times 20$) dans des complexes métalliques à ligands photochromes
- Mise en évidence d'un gain net à 1,55 μm atteignant 2,7 dB/cm dans des guides polymères monomodes dopés par des complexes d'erbium ou des boîtes quantiques de PbSe.
- Mise en évidence du couplage fort dans des microcavités à base de perovskites
- Mise en évidence d'un transfert d'énergie efficace à 99% entre une porphyrine et un nanotube, permettant d'activer la luminescence des nanotubes

Nano-photonique nonlinéaire et bio-photonique

- Etude structurale de micro- et nanostructures organiques, hybrides et inorganiques par microscopie confocale non linéaire polarisée
- Mise en place de la méthode d'imagerie non linéaire défocalisée pour la détermination de l'orientation tridimensionnelle de nano-objets
- Manipulation optique de nano-billes fluorescentes individuelles fonctionnalisées par le DR1 photoisomérisable ; étude des mouvements photoinduits
- Inscription et caractérisation de réseaux photo-inscrits dans des films nonlinéaires auto-organisés.
- Imagerie non linéaire de structures cellulaires
- Microscopie électro-optique et application à l'imagerie de membranes

Nano-photonique quantique

- Réalisation de l'expérience de Wheeler à « choix retardé »
- Mise au point de nanocristaux de diamants à centres NV associé au complexe nickel-azote, pour l'émission dans le proche infrarouge.
- Internalisation de nanocristaux de diamants à centre NV azote-lacune dans des cellules en culture
- Etude de non linéarités du second ordre à l'échelle nanométrique dans des nanocristaux de KTP : imagerie défocalisée, mesure de la phase de la GSH, interactions plasmoniques entre ue billes d'or attachée à une point AFM et un nanocristal de KTP

1 – 1 – 2 – 2 : Evolution des indicateurs

Le tableau ci-dessus donne l'évolution des indicateurs scientifiques de l'unité entre la période 2001-2004 et la période 2005-2008 qui fait l'objet du présent rapport :

Indicateur	ACL	ACT	INV	COM	Brevets	Thèses
2001-2004	75	9	48	39	5	7
2005-2008	103	22	72	62	1	12

La quasi-totalité de ces indicateurs a augmenté considérablement : 37 % pour les publications, 50 % pour les conférences invitées, 56% pour les communications, 71% pour les thèses soutenues avant fin 2008. Seul le nombre de brevets a diminué. Cependant, les nouvelles orientations du Laboratoire dans le domaine des capteurs à base de microcavités, la microscopie électro-optique ou la cryptographie quantique, ainsi que

l'obtention de contrats avec EADS et le LNE, permettent d'envisager avec une quasi-certitude une forte remontée de cet indicateur pour la période 2009-2013.

La forte croissance de ces indicateurs est le signe d'un grand dynamisme scientifique dont le présent rapport tente de rendre compte. Il faut souligner que ces performances sont obtenues dans des conditions difficiles que nous évoquerons de façon plus détaillée dans le compte rendu et la prospective : inaccessibilité des grandes revues internationales, non remplacement de deux ingénieurs (électronique et laser), accès très limité aux services de mécanique dont la fermeture est prévue en 2009 du fait du départ à la retraite de son responsable. Signalons aussi que l'Unité compte essentiellement des enseignants-chercheurs (grâce à la politique d'embauche très positive de l'ENS Cachan vis-à-vis de notre Unité) qui, pour la majorité d'entre eux, ne bénéficient pas de décharge d'enseignement. Il convient donc de pondérer ces résultats déjà très satisfaisants par ces données non mesurables mais qui pèsent lourdement sur le personnel du Laboratoire. Un infléchissement de ces indicateurs est d'ailleurs à craindre pour le prochain exercice si certains des problèmes les plus graves évoqués ici (fermeture des services d'électronique et de mécanique, inaccessibilité des revues scientifiques) ne sont pas rapidement résolus d'ici 2010.

1 – 1 – 3 – Mouvements de personnels permanents

Départs :

L'exercice 2005-2008 a vu le départ à la retraite de trois ingénieurs :

- Dominique Josse, ingénieur en instrumentation laser (juillet 2005)
- Rolland Hierle, ingénieur salle blanche (Décembre 2006)
- André Clouqueur, ingénieur de Recherches CNRS en électronique (février 2008)

R. Hierle et D. Josse étaient sous statut France Télécom, mais leurs salaires étaient financés par le CNRS. Rolland Hierle a été remplacé en décembre 2006 par Joseph Lautru, Ingénieur d'Etudes recruté par l'ENS Cachan et actuellement affecté à l'Institut d'Alembert pour la gestion de la salle blanche. Les deux autres ingénieurs n'ont pas été remplacés. Le Laboratoire fait de l'obtention d'un poste d'IR ou d'IE en électronique une priorité absolue pour le prochain quadriennal.

Pour les chercheurs et les enseignants-chercheurs :

- Michel DUMONT, Directeur de recherches CNRS, est passé au statut de DR émérite en septembre 2005
- Sophie BRASSELET, maître de conférences, a obtenu sa mutation pour l'Institut Fresnel à Marseille en Septembre 2006

Arrivées :

D'autre part, l'exercice écoulé a vu le recrutement de plusieurs chercheurs ou enseignants-chercheurs :

- Janvier 2005 : accueil au LPQM de Jacob SZEFTTEL, Ingénieur de recherches CEA, en détachement, rémunéré par le CEA.
- Février 2005 : recrutement de Jean-Sébastien LAURET comme maître de Conférences au département de physique, sur une création de poste dans le cadre d'une campagne nationale de recrutement de jeunes enseignants-chercheurs, au sein de l'équipe Matériaux et Nanostructures
- Septembre 2005 : recrutement de Frédéric GROSSHANS comme CR2 CNRS au sein de l'équipe Nanophotonique Quantique
- Septembre 2006 : recrutement de François TREUSSART, auparavant maître de Conférences au département de physique et déjà présent au LPQM depuis sa fondation, sur un poste de professeur des Universités, au sein de l'équipe Nanophotonique Quantique.
- Septembre 2007 : recrutement de Dominique CHAUVAT, auparavant maître de Conférences à l'Université de Rennes 1, au sein de l'équipe Nanophotonique Moléculaire et biophotonique, sur le poste laissé vacant par F. Treussart.
- Septembre 2008 : recrutement de Mélanie LEBENTAL, au sein de l'équipe Composants et Technologies, sur le poste laissé vacant par Sophie Brasselet.

Le LPQM demande pour 2009 un poste de CR2 CNRS (pour développer un projet de mise au point d'un nanomagnétomètre au sein de l'équipe de Nanophotonique quantique), ainsi qu'un poste d'ingénieur d'études en électronique.

1 – 1 – 4 – Répartition des crédits en 2006 et 2007

Le Laboratoire n'effectue aucun prélèvement sur les contrats de recherche.

Les crédits récurrents de l'Unité (34 850 euros par an pour l'ENS Cachan et 67 000 euros par an pour le CNRS) sont répartis comme suit :

Crédits ENS : ils couvrent une partie des dépenses de fonctionnement courant du laboratoire : frais d'infrastructure prélevés par l'ENS Cachan, fournitures de bureau, imprimantes et photocopieur, frais de réception et d'hébergement, reprographie, téléphone, informatique, courrier...

Crédits CNRS : Ils sont répartis de la manière suivante :

- 9500 euros versés à l'Institut d'Alembert au titre de la mutualisation des dépenses (rappelons que cet Institut finance la totalité des coûts de maintenance de la salle blanche)
- 4000 euros de frais de fonctionnement de la salle blanche hors maintenance
- 40 000 euros répartis uniformément entre les 4 équipes, soit 10 000 euros par équipe
- 13 500 euros en « fonds de secours » pour permettre le remplacement rapide d'un matériel stratégique et coûteux en cas de panne (en 2008, ces crédits ont été affectés au remplacement des diodes de pompe d'un laser femtoseconde).

1 – 1 – 5 – Organisation de congrès

Durant la période 2005-2008, les chercheurs du LPQM ont organisé les congrès suivants :

International Workshop on Atoms and Photons for Quantum Information , 25-26 Juillet 2005, Shanghai, Chine. Co-organisé par Jean-François Roch, Yuzhu Wang, Alain Aspect, Heping Zeng et Weiping Zhang.

The First France-Israel Bi-National Workshop on NanoBioPhotonics 10-12 décembre 2005, The Interuniversity Institute for Marine Sciences in Eilat, Israel, organisé par Sophie Brasselet et Robert Marks.
First Summer School on Molecular Nano- Bio-photonics for Telecommunication and Biotechnologies, 24-30 juin 2007, Porquerolles (France) (organisée par Joseph Zyss).

Novel Approaches to Bioimaging » Janilia Farms, Howard Hughes Medical Institute, USA, 9-11 mars 2008, co-organisé par Joseph Zyss, E. Betzig et C.V. Shank.

LEA "Nabi" CNRS-Weizmann 1st joint workshop, 5-6 juin 2008, Institut d'Alembert, ENS Cachan, France (organisé par Joseph Zyss).

Second Summer School on Molecular Nano- Bio-photonics for Telecommunication and Biotechnologies, 19-27 juin 2007, Porquerolles (France) (organisée par Joseph Zyss).

Application du diamant à la biologie, 25-30 octobre 2008, Institute of Atomic and Molecular Science (IAMS), Academia Sinica, Taipei. Co-organisé par François Treussart et Huan-Cheng CHANG (IAMS).

Workshop d'experts européens sur la prospective en biophotonique (patronné et financé par la Commission européenne), 11-12 décembre 2008, Institut d'Alembert, ENS Cachan, France (organisé par Joseph Zyss).

1 – 2 – Bilan des équipes de recherche

1 – 2 – 1 – Equipe « Composants et technologies pour la photonique »

Pendant la période 2005-2008, nos recherches sur les composants à base de polymères électro-optiques pour les télécoms ont été menées suivant deux axes principaux : les composants actifs (modulateurs électro-optiques, convertisseurs opto-hyperfréquence pour la radio sur fibre) pour répondre aux besoins des télécommunications optiques à haut et très haut débit (10 à 40 Gbits/s), et les composants passifs et actifs pour les applications de multiplexage en longueurs d'onde (WDM) tels que les dispositifs d'insertion-extraction et les commutateurs électro-optiques rapides. Nous avons également étudié une nouvelle génération de modulateurs électro-optiques, sous la forme d'un modulateur à structure résonante. Grâce à la structure résonante du dispositif, on peut à la fois réduire la tension de commande V_n du modulateur et modifier la longueur d'onde de la porteuse optique pour les applications de

multiplexage en longueurs d'onde (WDM). Ce modulateur présentera des bandes passantes étroites, tout en fonctionnant à haute fréquence (> 10 GHz).

1 – 2 – 1 – 1 : Filière de composants électro-optiques d'optique intégrée à base de polymères (Chi Thanh Nguyen, Sébastien Michel)

a) Modulateurs « classiques » (phase et Mach-Zehnder) : tension de commande et bande passante

Dans le cadre de l'étude des modulateurs de phase et Mach-Zehnder classiques à base de polymères électro-optiques, nous avons optimisé la structure du composant en sélectionnant les couches extérieures (cladding) de manière à optimiser l'efficacité de l'orientation du composant en réalisant un report maximum de champ à proximité du cœur électro-optique du modulateur. Faute de pouvoir obtenir de nouveaux matériaux électro-optiques performants qui ne sont pas disponibles commercialement, nous utilisons le polymère PMMA/DR1 greffé et thermo-réticulable, synthétisé en proportion de masse de 70/30 et 50/50 par la start-up *Specific Polymers* de l'ENSC de Montpellier. Ce polymère électro-optique, qui possède un coefficient r_{33} respectivement de 8 pm/V pour PMMA/DR1 (70/30) et de 12 pm/V à 1,55 μm pour PMMA/DR1 (50/50) est très stable, robuste et facile à manipuler. C'est la raison pour laquelle nous utilisons ce polymère comme une référence pour nos études de faisabilité des composants. Les mesures de tension de commande V_n obtenues sur différentes configurations (modulateurs de phase et Mach-Zehnder) ont montré une meilleure performance pour la configuration du guide NOA73-PMMA/DR1(50/50)-NOA73, où le champ électrique d'orientation peut atteindre 100 V/ μm dans le cœur électro-optique. Avec un coefficient électro-optique r_{33} relativement modeste de 12 pm/V, nous avons obtenu une tension de commande modérée, de 5 volts à 1 KHz de fréquence de modulation (figure 1), pour un modulateur de phase de longueur d'interaction de 25 mm, ce qui correspond à une figure de mérite de 12,5 Volt.cm. Cette valeur est de loin la meilleure obtenue sur les modulateurs polymères depuis plus de 10 ans au laboratoire. A titre de comparaison, un modulateur de phase en niobate de lithium avec un coefficient électro-optique 3 fois plus grand (~ 32 pm/V) présente une figure de mérite de l'ordre de 8 Volt.cm. Cette étude a été réalisée dans le cadre de la thèse de doctorat de Sébastien Michel qui s'achèvera en fin 2008.

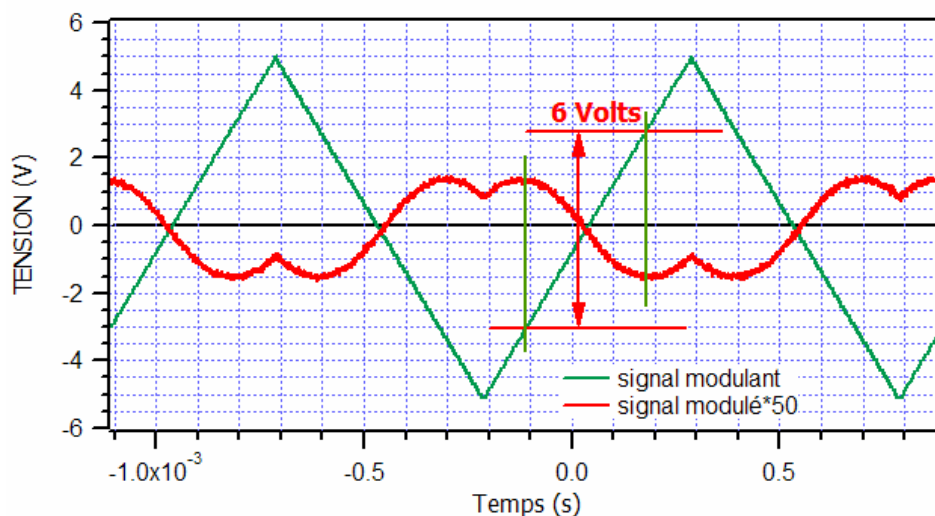


Figure 1. Tension demi-onde obtenue pour d'un modulateur de phase composé d'un cœur en polymère électro-optique greffé PMMA/DR1(50/50) et de couches externes en colle époxy NOA73.

Nous avons également étudié la bande passante électrique de ces modulateurs à hautes fréquences pour répondre aux applications de télécoms à haut et à très haut débits. Cette étude a été menée grâce à la conception et à la réalisation de modulateurs à ondes progressives dont les électrodes forment avec le guide d'onde optique une ligne de transmission adaptée en impédance.

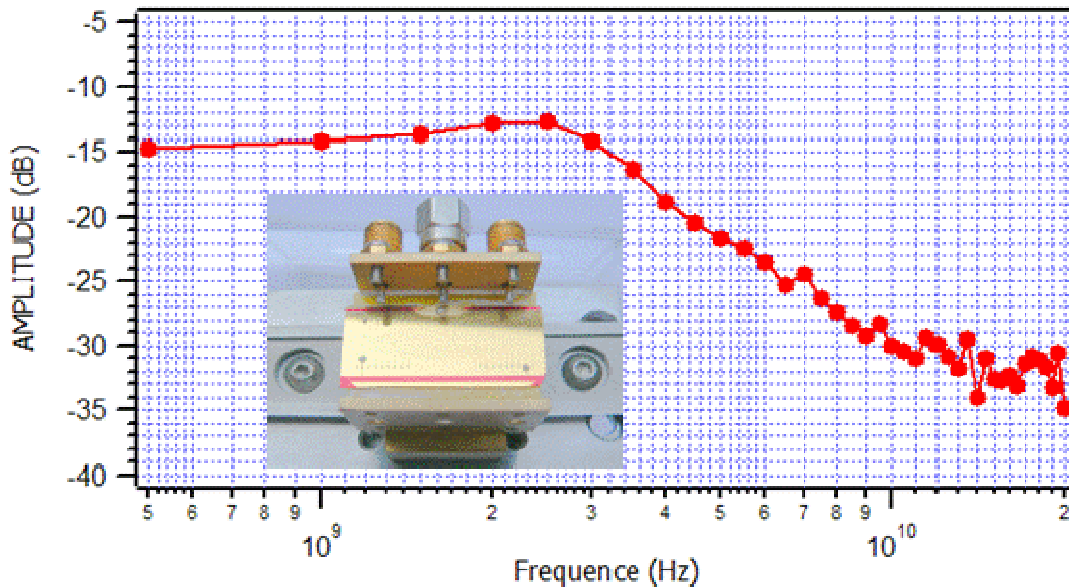


Figure 2. Réponse fréquentielle d'un modulateur de phase à onde progressive réalisé à base de polymère électro-optique greffé PMMA/DR1(50/50) en masse. En insert : Montage d'un composant actif (modulateur de phase à haute fréquence, convertisseur opto-hyperfréquence) à base de polymère électro-optique greffé PMMA/DR1(50/50) en masse.

Nous avons collaboré avec le laboratoire SATIE (B. Journet), dans le cadre des actions de recherche concertées au sein de l'Institut d'Alembert de l'ENS de Cachan, sur la conception et la caractérisation à hautes fréquences de ces composants, dont la bande passante théorique peut atteindre 20 GHz. Sur la figure 2 est représentée la réponse expérimentale en fréquence d'un modulateur de phase à onde progressive dont le montage est présenté dans l'insert de la Figure 2. Nous avons mis en évidence une bande passante (à -3dB) de 4 GHz et une atténuation de -17 dB à 20GHz. Cette performance limitée à quelques GHz s'explique par des problèmes de connexion électrique à très hautes fréquences sur le composant polymère. Nous avons connecté des électrodes du modulateur aux connecteurs SMA (dont la bande passante est de 18 GHz) par des fils d'or de $50\text{ }\mu\text{m}$ de diamètre, collés directement sur les électrodes par colle époxy conductrice (figure 3). Ce type de connexion s'est avéré inadaptée, car elle introduit des filtres capacitifs et inductifs notables dans la réponse fréquentielle du dispositif. Dans le prochain projet de composants polymères à très hautes fréquences, nous envisageons des circuits plus élaborés comportant des transitions microruban-coplanaire et des connecteurs du type K (dont la bande passante peut atteindre de trentaine de GHz) .

b) Modulateurs à structure résonante

La recherche sur ce type de modulateur se développe rapidement en utilisant comme structure résonante des micro-résonateurs (micro-disque ou micro-anneau). En particulier, le modulateur polymère électro-optique à onde progressive utilisant un micro anneau comme élément résonant a atteint récemment un record de fréquence de modulation à 165 GHz ¹. On peut également utiliser un réseau de Bragg en contre-réaction distribuée (DFB pour *Distributed Feed-back*) ou en miroirs de Bragg (DBR pour *Distributed Brag Resonators*) en cavité Fabry-Pérot. L'intérêt de ce type de dispositif en optique guidée tient au fait que les guides sont rectilignes ou quasi-rectilignes et subissent donc moins de pertes que dans les micro-anneaux. En outre, le couplage est plus efficace dans les réseaux de Bragg. Nous avons donc choisi cette structure résonante pour configurer nos modulateurs polymères électro-optiques à résonance (figure 3). Si la longueur d'interaction dans un modulateur classique est L , la longueur effective d'interaction dans un modulateur résonant est approximativement égale à $L_{\text{eff}} = L \times Q$, où Q est le facteur de qualité de la cavité. Ce rendement d'interaction permet en principe de diminuer la tension de commande V_n du modulateur. Mais la structure résonante du modulateur se comporte comme un double filtre: il joue en même temps le rôle de filtre spectral pour la porteuse optique et de filtre en hyperfréquences pour la fréquence électrique de modulation. Par conséquent, la bande passante

¹ B. Bortnik et al., *IEEE Journal Sel. Top. Quantum Electron.*, **13**, 1, 104-110, January/February 2007.

du modulateur n'est plus large comme dans le cas des modulateurs classiques (modulateur de phase ou Mach-Zehnder) mais elle présente une série de bandes passantes étroites situées aux fréquences de résonance de la réponse fréquentielle du dispositif. La localisation de ces bandes étroites dépend de la durée de vie intra-cavité des photons qui participent à l'interaction électro-optique dans le modulateur. Des mesures récentes ont montrés qu'en comparant avec le modulateur Mach-Zehnder classique, le modulateur résonant présente dans sa réponse des bandes passantes étroites à très hautes fréquences, le maximum de ces bandes étant beaucoup moins atténué à ces fréquences par rapport au modulateur classique².

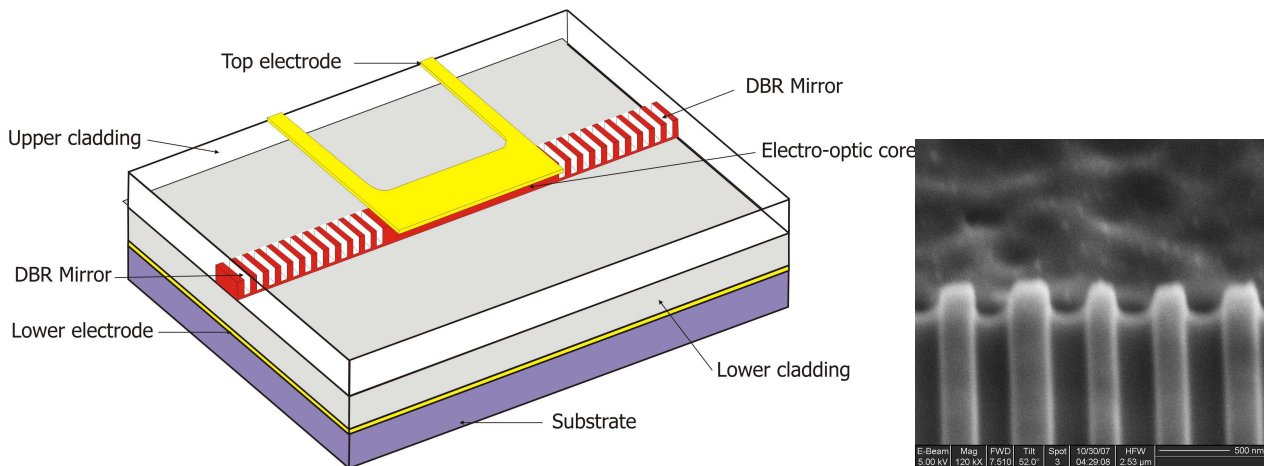


Figure 3. (a) Schéma d'un modulateur de phase à structure résonante utilisant deux miroirs de Bragg pour former une cavité Fabry-Perot .(b) Image prise sous microscope électronique à balayage d'un réseau de Bragg gravé par faisceaux d'ions focalisés sur le cœur du modulateur en polymère électro-optique PMMA/DR1(70/30).

Pour le réseau de Bragg utilisé dans cette structure, on peut réaliser une gravure directe du réseau sur le cœur électro-optique du guide d'onde optique. La période des réseaux de Bragg est de l'ordre de 400 à 500 nm. Les moyens de photolithographie traditionnelle dont nous disposons au laboratoire ne permettent pas de réaliser avec précision cette structure, nous devons donc recourir à des méthodes de gravure par faisceaux électroniques (e-beam) ou faisceaux d'ions focalisés (FIB) dont la résolution est beaucoup plus grande. Grâce à une collaboration avec le CRANN du Physics Department de Trinity College à Dublin, en Irlande, nous avons pu accéder à la gravure par faisceaux d'ions focalisés disponible dans ce laboratoire pour réaliser les réseaux de Bragg sur les guides en polymère électro-optique, préparés préalablement dans notre salle blanche. Sur la figure 3b est représentée l'image prise sous MEB d'un réseau de Bragg gravé par le faisceau ionique sur le cœur du modulateur de phase en polymère électro-optique PMMA/DR1(70/30). Nous avons déposé ensuite dans notre salle blanche la couche de confinement supérieure en colle époxy NOA73, puis l'électrode d'or pour l'orientation et la commande. La caractérisation de ces réseaux de Bragg et l'étude de la fonction de transfert optique de ce type de modulateurs sont en cours.

1 – 2 – 1 – 2 : Composants à base de polymères pour la radio sur fibre

Ce thème a été étudié dans le cadre de la thèse de doctorat de François Duport qui sera soutenue en 2008. Il s'agit de concevoir et de réaliser un convertisseur opto-hyperfréquence à base de polymère électro-optique pour des applications de radio sur fibre. Ce dispositif permettra de convertir des informations codées sur une porteuse optique vers des signaux radiofréquences utilisés pour des moyens de communications mobiles (radio sur fibre). Ce travail de recherche a été l'objet d'une collaboration étroite entre notre équipe du LPQM et Bernard Journet du SATIE qui possède des compétences dans le domaine des micro-ondes. Nous avons conçu et réalisé dans notre salle blanche le convertisseur opto-hyperfréquence qui est basé sur une

² K. K. Mc Lauchlan and S. T. Dunham, *IEEE Journal Sel. Top. Quantum Electron.*, **12**, 6, 1455-1460, November/December 2006.

configuration simple associant un guide d'onde optique et un guide d'onde micro-onde à onde progressive. Une onde radiofréquence est générée par différence de fréquence entre deux fréquences optiques proches (autour de 1550 nm) grâce aux propriétés optiques non-linéaires quadratiques du guide polymère électro-optique PMMA/DR1(50/50). La capture de l'onde radiofréquence émise est assurée par le guide micro-onde. Pour réussir, cette opération doit assurer un très bon accord des vitesses de phase entre les ondes optiques et la micro-onde dans le double guide. Afin de tester cette conversion de fréquence, il nous faut vérifier que le signal de battement entre deux lasers libres est suffisamment stable et détectable par une photodiode très rapide. Sur la figure 4 est représenté le signal de battement à 13,8 GHz de deux lasers accordables non asservis émettant autour de 1550 nm. La détection du signal est assurée par une photodiode rapide de bande passante de 18 GHz. A faible puissance d'injection, (0,5 mW et 1 mW pour deux lasers), le signal est suffisamment stable et détectable par la photodiode

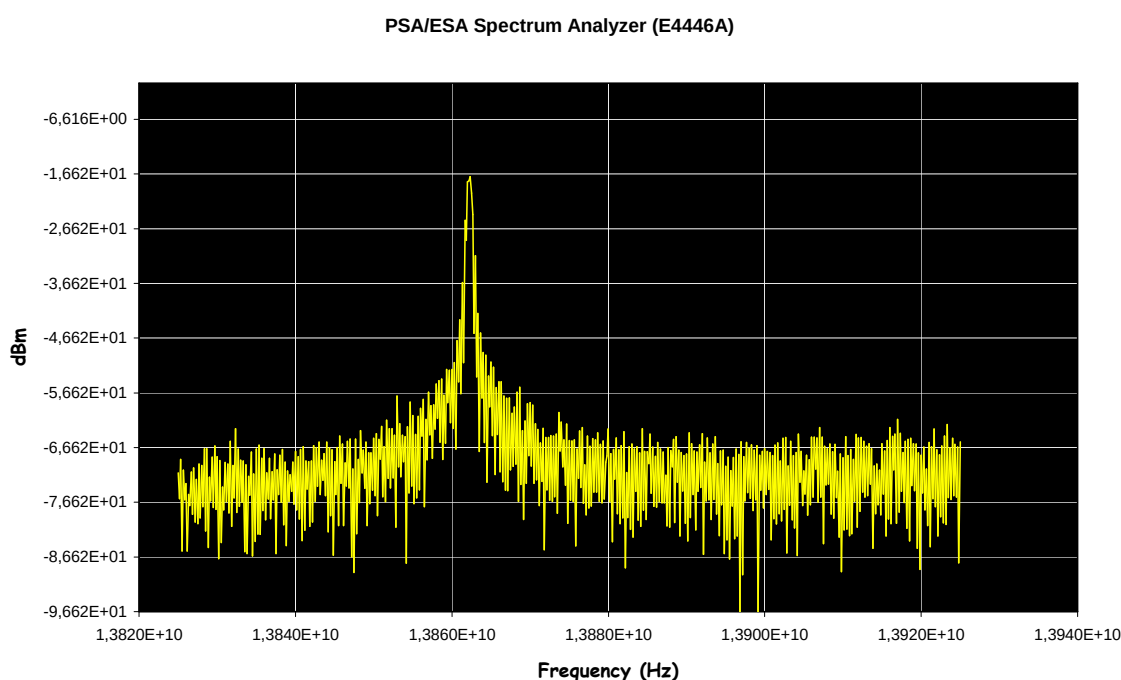


Figure 4. Signal de battement entre deux lasers accordables libres (non asservis) et émis à 1550 nm, détecté par une photodiode rapide (bande passante de 18 GHz).

Nous n'avons pas pu observer le signal radiofréquence avec le convertisseur réalisé au laboratoire. De fait, le coefficient électro-optique du polymère électro-optique PMMA/DR1(50/50) reste trop faible pour pouvoir induire un effet observable dans le guide d'onde. D'après notre estimation et les données de la littérature, il faudrait au moins un coefficient électro-optique de 3 ou 4 fois plus élevé pour pouvoir induire un signal micro-onde observable. Cette condition serait réalisable en utilisant soit un nouveau polymère de fort coefficient électro-optique (des études récentes ont mis en évidence de nouveaux polymères possédant des coefficients électro-optiques allant jusqu'à 200 pm/V) soit une cavité résonante du type Fabry-Pérot comme celle étudiée ci-dessus pour pouvoir bénéficier du facteur de qualité de cette cavité. C'est pour cette raison que le projet de recherche consacrera un effort particulier à la réalisation de microstructures résonantes.

1 – 2 – 1 – 3 : Développement de technologies de "soft lithographie" pour composants photoniques à base de polymères

Dans le cadre d'une nouvelle orientation de notre activité de recherche vers la biodétection par des capteurs optiques intégrés (voir la partie prospective du rapport), nous avons initié en 2008 une collaboration avec Mme Anne-Marie Haghiri-Gosnet, directrice de recherche au Laboratoire de Photonique et Nanostructures (LPN) à Marcoussis, sur la réalisation de composants optiques intégrés à base de polymères par la méthode de nanoimpression. Il s'agit de réaliser des circuits optiques guidés par la méthode d'impression thermique et/ou par la méthode hybride (moulage thermique et redressage par RIE à oxygène). Grâce à cette collaboration, nous pouvons accéder aux moyens de nanoimpression dont le LPN s'est récemment équipé. Des micro-anneaux à base de photorésine SU-8 déposée sur la silice sont en cours de réalisation, en vue de constituer les cellules de base de nos biocapteurs. Nous envisageons dans le futur proche de réaliser des

réseaux de Bragg sur des guides optiques polymères par cette technologie. Cette méthode de fabrication précise (qui permet d'atteindre des détails de 70 nm) et bas-coût pour une production massive de composants nous permet de développer notre recherche de composants photoniques à base de polymères vers d'autres applications auxquelles nous ne pouvons pas accéder par les moyens de photolithographie traditionnelle.

1 – 2 – 1 – 4 : Amplificateurs optiques pour les télécoms (Chi Thanh Nguyen, Isabelle Ledoux, Anh Quoc Le Quang, Laurent Badie)

Dans le cadre de notre études sur l'intégration de composants fonctionnels actifs (modulateurs, commutateurs électro-optiques) ou passifs (filtre insertion-extraction, filtre spectral, coupleurs, multiplexeurs) à base de polymères sur une puce photonique de base qui constituera un sous-système de télécoms optiques, nous avons besoin d'intégrer sur la même puce la source (microlaser à semiconducteur ou en polymère) et l'amplificateur optique sous forme d'un guide d'onde à fort gain.

Dans cette direction nous avons collaboré avec Isabelle Ledoux (Equipe Matériaux et nanostructures du LPQM) pour la conception, la réalisation et la caractérisation d'amplificateurs optiques intégrés pour la fenêtre des télécoms optiques autour de 1550 nm. Ces amplificateurs sont constitués de guides en PMMA dopés par des boîtes quantiques à base de PbS/PbSe réalisées par les chimistes du Technion Institute à Haifa (Efrat Lifshitz), Israël. Ce travail a été réalisé dans le cadre de la thèse de doctorat de Laurent Badie. Le pompage optique de l'amplificateur est réalisé par co-propagation d'un faisceau de laser de pompe à 980 nm et du signal optique à amplifier à 1550 nm. Pour assurer l'optimisation du pompage, il faut que le guide optique de l'amplificateur soit monomode pour les deux longueurs d'ondes (980 nm et 1550 nm). Sur la figure 5 est représentée la réponse en gain net (rapport de la puissance de sortie sur la puissance d'entrée par rapport au guide) pour un guide d'onde optique à base de PMMA dopé par des boîtes quantiques PbS/PbSe, et pompé par co-propagation d'un faisceau à 980 nm.

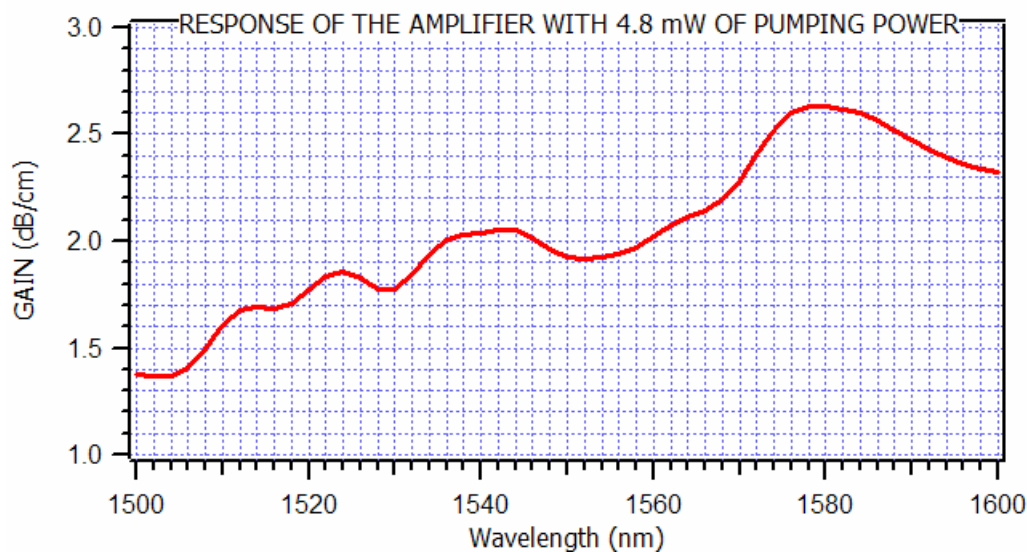


Figure 5. Réponse en gain net d'un amplificateur optique à guide d'onde à base de boîtes quantiques PbS/PbSe dopées dans la matrice de polymère PMMA.

Le gain obtenu est supérieur à celui qui a été mis en évidence avec un guide PMMA dopé par des complexes d'erbium (voir compte rendu de l'équipe Matériaux et Nanostructures pour la Photonique), notamment pour les longueurs d'onde les plus élevées. Cependant, des études à plus long terme ont montré que ces matériaux évoluent avec le temps, le domaine spectral d'amplification se déplaçant vers les plus courtes longueurs d'onde du fait d'une probable dégradation des boîtes quantiques.

1 – 2 – 1 – 5 : Microcavités laser (IJoseph Zyss, Mélanie Lebental, Nadia Djellali)

a) Historique et principales motivations

L'étude des microcavités lasers à modes de galerie a été introduite au début de la décennie (i.e. au cours de l'exercice précédent) dans le groupe en réponse à une double motivation à caractères à la fois fondamental et appliqué. Elle s'inscrit en effet dans une double perspective:

- L'étude des problématiques fondamentales ayant trait au chaos ondulatoire en régime dissipatif comme systèmes modèles « classiques » pour la décohérence d'une part,

- Le développement de nouveaux composants pour des applications duales aux technologies de l'information (composants intégrés d'amplification et d'émission de lumière cohérente, points de commutation et de routage photonique) et aux biotechnologies (senseurs et capteurs chimiques et biologiques) d'autre part.

Une collaboration avec les groupes de Richard Chang et Doug Stone à l'Université de Yale (Dept. of Applied Physics) et de Jean-Pierre Wolf (Université de Lyon I) a joué un rôle majeur dans l'initiation de ces études : elle a permis de fonder les bases de cette activité et d'en fournir les premières validations expérimentales et théoriques, en établissant en particulier la pertinence des technologies à base de polymères à plus faibles indices et donc moins confinants que les semi-conducteurs inorganiques, et en nous permettant d'atteindre assez vite l'état de l'art international compte-tenu de notre savoir-faire technologique et expérimental de départ développé par ailleurs dans le domaine des composants électro-optique. Le domaine des microcavités à modes de galerie à base de polymères étant vierge au démarrage de cette étude, nous avons donc été pionniers dans le domaine et ouvert la voie à d'autres travaux, en attirant l'attention sur la simplicité et la flexibilité des technologies associées aux polymères tout en montrant l'intérêt de cavités à bas indice. Nous n'avons toutefois pas vraiment approfondi les aspects fondamentaux dans cette phase d'ouverture du domaine, au moins jusqu'au début de l'exercice actuel, essentiellement marqué par des premières démonstrations et le recours à des modèles phénoménologiques de type simulation. Les aspects chaotiques (par exemple liés à des contours de type billards chaotiques) n'avaient pas non plus été abordés. L'exercice actuel (2006 à aujourd'hui) peut être considéré d'une part comme une phase de consolidation théorique et fondamentale, et a été marqué d'autre part par de profondes innovations méthodologiques associant une théorie physico-mathématique véritable à des effets non-linéaires dans les microcavités lasers, en prenant en compte de façon essentielle les effets du régime chaotique sur les propriétés angulaires et spectrales de l'émission. Par ailleurs, les aspects applicatifs, en partie sous l'influence de l'Institut d'Alembert et d'une forte collaboration sur ce thème avec le PPSM (relayée également par un programme européen) se dirigent depuis le début de l'année 2008 vers la mise en environnement microfluidique des micro-lasers, de façon à développer une génération originale et plus performante de micro-capteurs (brevet Zyss-Lebental en cours d'étude).

Cette phase a été caractérisée par l'intrication étroite et particulièrement féconde, de trois grands domaines d'activités :

- **Technologie** : réalisations de composants de formes variées, soit grâce à une technologie « maison » en salle blanche à Cachan (cf. figure 6), soit en ayant recours à des collaborations extérieures avec des centrales nationales de technologie du CNRS quand le degré de qualité de gravure l'exigeait,
- **Photonique expérimentale** : détermination des caractéristiques spectrales et angulaires des microcavités laser par observation latérale réalisée sur un banc de mesures dédié,
- **Théorie** : menée à trois niveaux différents et complémentaires, en relation étroite avec les résultats expérimentaux :
 - o méthodes du chaos ondulatoire (méthodes semi-classique et théorème de trace), en collaboration avec Eugène Bogomolny à l'Université Paris XI
 - o simulation de type Monte-Carlo par tirage au sort de rayons
 - o résolution numérique complète de l'équation de Maxwell dans l'approximation scalaire (par une méthode de type fonction de Green définie sur le contour de la cavité), en collaboration avec Charles Schmit à l'Université d'Orsay.

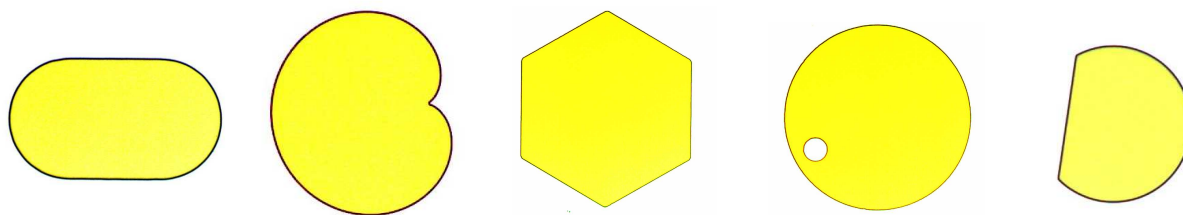


Figure 6 : Photographies au microscope optique de micro-cavités lasers organiques gravées par photolithographie et attaque ionique réactive dans la salle blanche de l'IFR d'Alembert. De gauche à droite, un stade, une cardioïde, un hexagone, un disque troué et un disque coupé. Dimensions latérales typiques de l'ordre de 100 μm .

b) Principaux résultats acquis (2006-été 2008)

Les principales familles de cavités systématiquement étudiées ont été les disques, les polygones (triangles, carrés et polygones réguliers jusqu'à l'octogone), les stades et disques coupés, ces deux derniers étant caractérisés par un comportement chaotique.

La méthodologie originale développée dans ce contexte avait pour but d'identifier les orbites correspondant aux modes lasers émissifs, pour différents types et tailles de cavité ainsi que leurs caractéristiques directionnelles (les paramètres de pompage, tels que l'intensité de la pompe au-delà du seuil, dont certains effets importants ont été reconnus à un niveau préliminaire, seront considérés plus en détails au cours du prochain exercice.

Pour cela, nous avons élaboré et systématisé l'examen des spectres d'émission, dont la transformée de Fourier permet dans beaucoup de cas (en particulier s'il s'agit de structures dissipatives ne se prêtant à l'activation que d'une seule orbite, comme c'est le cas pour les structures à faibles indices à base de polymères) d'identifier la nature des orbites à l'intérieur de la cavité, à l'aide de leur périmètre optique. Les comportements différents entre des polygones à nombres de côtés pairs et impairs ont été élucidés ainsi que des relations entre les hypothèses géométriques et les caractéristiques spectrales, l'indice effectif étant estimé indépendamment par ellipsométrie spectroscopique et la méthode de l'indice effectif.

Issue de la physique mathématique du chaos quantique et des méthodes analytiques semi-classiques, l'application du théorème de trace s'est avéré un outil puissant permettant d'exprimer la densité d'états (e.g. de modes électromagnétiques confinés) sous forme d'un développement par rapport aux orbites périodiques classiques possibles dans la cavité, en les pondérant de facteurs opto-géométriques tels que le périmètre orbital ou l'aire balayée par l'orbite. Son expression avait été donnée dans le cas de cavités closes et nous l'avons étendue à celui des cavités ouvertes et chaotiques (ces dernières faisant intervenir des considérations relatives aux pertes optiques et à la stabilité mesurée par un exposant de Lyapounov). Les justifications mathématiques exactes en ont été données pour certaines formes de cavités et la généralisation à des géométries arbitraires a été confirmée expérimentalement ainsi que par des simulations numériques. Le disque coupé (plus favorable que le stade à cet égard) a été choisi pour les études expérimentales concernant la détermination des orbites dans une microcavité diélectrique ouverte. Cette étude a permis de valider les prédictions théoriques concernant l'influence conjuguée de l'exposant de Lyapounov et des pertes diélectriques sur l'orbite dominante en fonction de l'évolution de la déformation donnée du disque. Un « saut » d'orbites attractrices a ainsi été mis en évidence expérimentalement et corroboré indépendamment par le modèle issu du théorème de trace et par les calculs électromagnétiques.

Par ailleurs, un modèle analytique de type « super-scar », également étendu à partir de la démarche validée dans le cas des cavités closes, a permis d'aboutir à des expressions analytiques (pour les cavités polygonales) de l'énergie et des fonctions d'onde confinées, en très bon accord avec le calcul électromagnétique complet par simulations numériques (PRA, 76, 023830, 2007).

La recherche sur les fonctions d'onde s'est poursuivie avec le développement d'une méthode analytique issue du calcul des perturbations qui s'adapte à toute déformation du disque raisonnablement faible et dont nous avons démontré la pertinence dans le cas particulier du disque coupé (PRA, 77, 013804, 2008).

De plus une étude systématique des directions d'émission a été menée dans le cas du stade, et a permis d'identifier des directions d'émission bien définies, ce qui n'était pas a priori évident pour une forme chaotique. Ces directions expérimentales ont été validées par un modèle d'optique géométrique de type Monte Carlo, des calculs électromagnétiques complets ainsi qu'un modèle analytique simple faisant intervenir un effet de lentille (cf. Figure 7 et PRA 75, 033806, 2007). Ces travaux ont ensuite été généralisés à une grande variété de cavités, comprenant des formes intégrables et chaotiques.

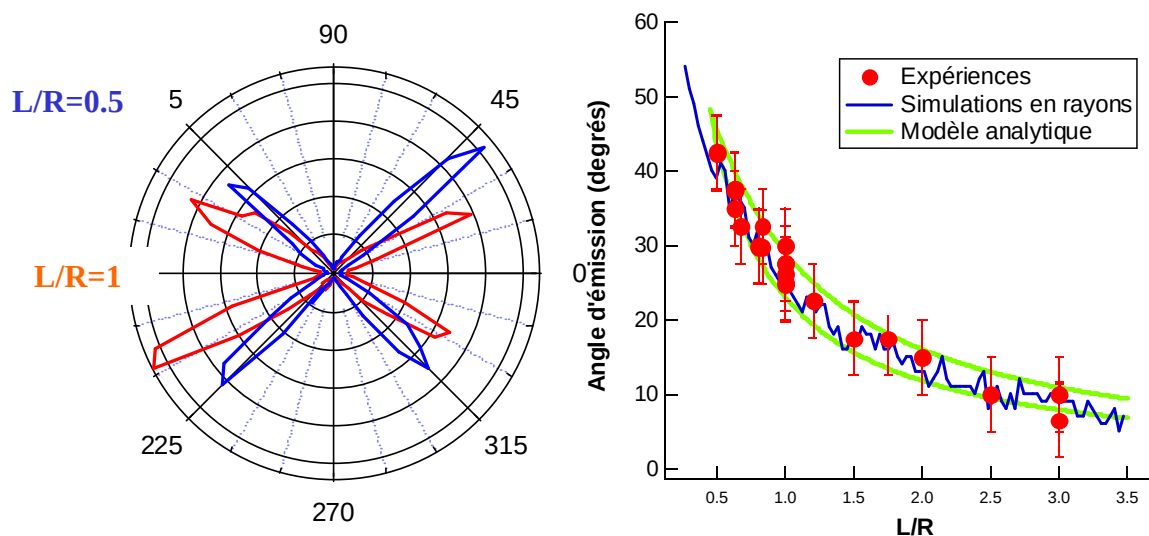


Figure 7 : Etude des directions d'émission de micro-lasers organiques en forme de stade (L =demi-longueur, R =rayon). A gauche, diagrammes polaires d'émission expérimentaux pour deux elongations différentes, à droite, comparaison entre expériences, simulations numériques et modèle théorique

1 – 2 – 2 – Equipe « Matériaux et nanostructures pour la photonique »

1 – 2 – 2 – 1 : Ingénierie moléculaire pour la photonique (Isabelle Ledoux, Anh Quoc Le Quang, , Nicolas Tancrez, Khuyen Hoang Thi, Laurent Badie)

Les directions esquissées durant l'exercice précédent se sont développées selon deux directions privilégiées :

a) Structures non linéaires photo- et électrocommutables (Thèse de Khuyen Hoang Thi)

Dans le cadre de la coopération instaurée de longue date avec l'Université de Rennes 1 (Hubert Le Bozec), nous avons étudié en premier lieu des composés photochromes pour lesquels la modification de structure induite par irradiation optique s'accompagne d'une forte modification de couleur. Il s'agit de complexes métalliques de $Zn^{(II)}$ où le ligand est une 2,2' bipyridine substituée en *para* des pyridines par un système conjugué photocyclisable de la famille des diaryléthènes. Sous irradiation dans le proche UV, on passe d'une forme « ouverte », avec brisure de conjugaison, jaune pâle, à une forme « fermée », conjuguée sur un grand nombre d'électrons π , et bleu foncé. Des mesures (effectuées par génération de second harmonique sous champ électrique en solution, ou EFISH) du facteur $\mu\beta$, où μ est le moment dipolaire permanent du complexe et β son hyperpolarisabilité quadratique dipolaire, ont mis en évidence une augmentation considérable de ce produit $\mu\beta$ (d'un facteur 20) par photocyclisation. La figure 8 ci-dessous donne les structures des deux formes et les valeurs correspondantes du produit $\mu\beta$. La très grande sensibilité de la nonlinéarité quadratique à des modifications photoinduites de structure du système π permet d'envisager des applications intéressantes dans le domaine de l'inscription réversible d'information dans un matériau contenant ces molécules photochromes. La stabilité de ces molécules après plusieurs centaines de transitions entre forme ouverte et fermée constitue un atout essentiel pour la mise au point de composants à non linéarités photocommutables. Ces résultats ont permis à l'équipe d'obtenir un financement de l'ANR à partir de fin 2008 en partenariat avec l'Université de Rennes 1.

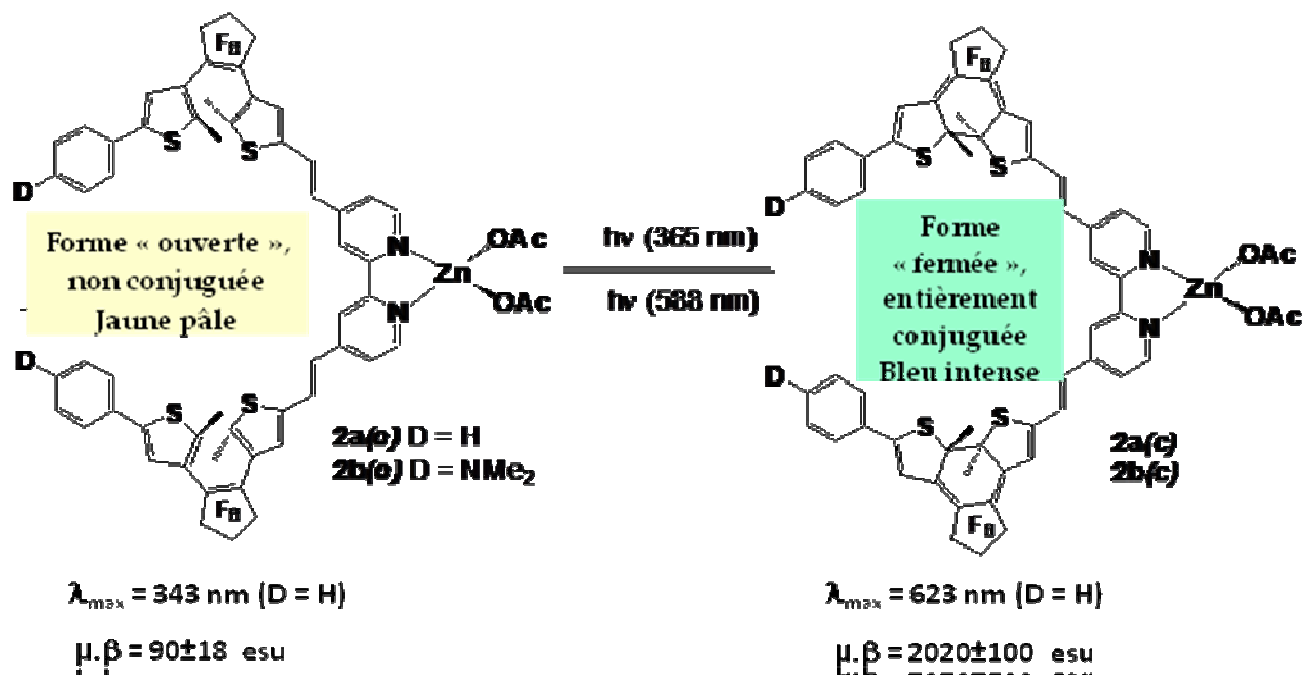


Figure 8 : Forme ouverte (à gauche) et fermée (à droite) du complexe de Zn^(II) bipyridine à ligand conjugué à base de diaryléthène. Les λ_{max} désignent les maxima d'absorption en spectroscopie UV-visible.

L'étude sera poursuivie dans le cadre de cette ANR dans le domaine des complexes octupolaires. Un autre type de commutation, d'origine électrique, peut être envisagée avec des dérivés organométalliques conjugués dans lesquels une des extrémités (ici le groupement donneur) peut être modifiée par des processus redox, notamment en modifiant le nombre d'oxydation d'un métal fonctionnant, au sein d'un complexe de coordination, comme un groupement donneur. Une collaboration avec une autre équipe de Rennes 1 (F. Paul et C. Lapinte) a permis, en utilisant la méthode EFISH comme précédemment, de mettre en évidence une inversion du signe du produit $\mu.\beta$ par oxydation du fer(II) en fer(III) du groupement fer-cyclopentadiényle, initialement donneur très efficace (Figure 9) et devenu fortement accepteur après oxydation. Le changement de signe s'accompagne d'une forte diminution de la nonlinéarité (d'un facteur 5). On a ainsi montré qu'il est possible de contrôler la nonlinéarité moléculaire par voie électrochimique.

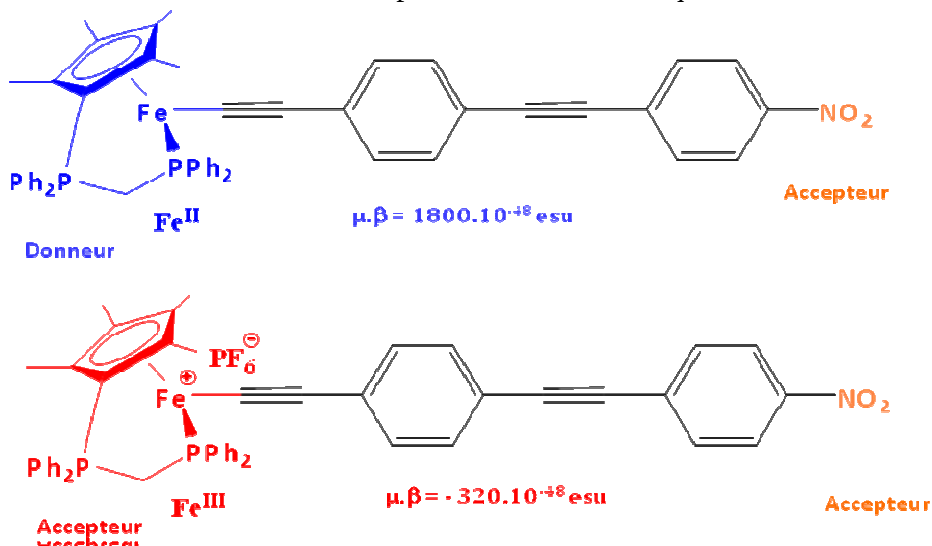


Figure 9 : Structures et produits $\mu.\beta$ d'un composé organométallique de type donneur-accepteur sous sa forme réduite (fer(II) en haut) et oxydée (Fer (III), en bas).

b) Matériaux polymères amplificateurs à 1,55 μm : complexes organiques d'erbium(III) (Thèse d'Anh Quoc Le Quang)

Un nouvel axe de recherche entrepris depuis début 2003 porte sur l'élaboration et la caractérisation de matériaux polymères pour l'amplification à 1,55 μm , dans le domaine des télécommunications optiques. Une première stratégie consiste à insérer des ions Er³⁺ en matrice polymère, sous forme de nanoparticules d'oxyde d'Yttrium Y₂O₃ dopées par des ions Er³⁺ et éventuellement des ions Yb³⁺ qui améliorent le

rendement d'excitation de l'erbium. L'intérêt de cette solution « hybride » réside dans le fait que les ions erbium demeurent en matrice inorganique, et ne sont donc pas soumis à des effets de désexcitation non radiatives provoqués par les modes de vibration des liaisons C-H, C-O et O-H présentes en milieu organique. A la fin de l'exercice précédent, nous avons caractérisé les propriétés photophysiques de ces particules. Cependant, leur insertion en matrice polymère s'accompagne de phénomènes d'agrégation qui conduisent à la formation de conglomerats de taille micronique et donc fortement diffusants. Nous avons alors mis à profit une collaboration avec l'Université de Montpellier (R. Corriu, C. Reyé) qui nous a permis de disposer de complexes d'erbium reliés directement à des ligands de type oxyde de phosphine et nitro pour lesquels les phénomènes de désexcitation non radiative dans le proche IR sont moins importants que ceux dus aux liaisons usuelles des composés organiques. Une étude photophysique complète, en collaboration avec l'Université Claude Bernard de Lyon (B. Jacquier), a permis de mettre en évidence des temps de vie longs pour l'émission à 1,55 μm (de l'ordre de quelques millisecondes) et de prévoir la possibilité d'une inversion de population dans ce domaine spectral. Des guides d'onde monomodes, formés de PMMA dopé par ces complexes d'erbium, ont été conçus et élaborés au LPQM. Leur caractérisation en optique guidée a été réalisée chez CoreCom (Milan, coll. S. Pietralunga) dans le cadre du réseau européen d'Excellence PHOREMOST dont le LPQM fait partie. Un gain modeste, mais significatif, de 0,9 dB/cm sous un pompage continu à 980 nm et de 50 mW de puissance, a été mis en évidence dans ces guides (Figure 10). Cette réalisation est, à notre connaissance, la première dans un guide polymère en régime de propagation monomode.

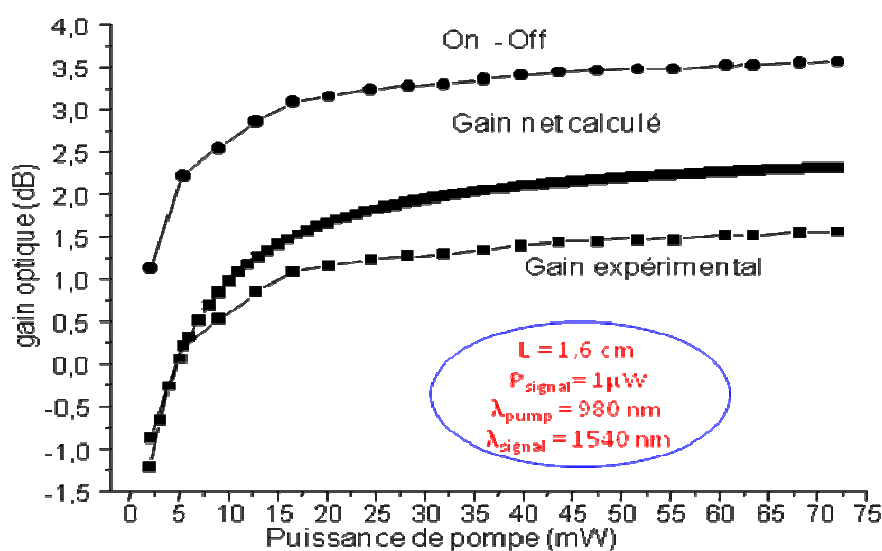


Figure 10.: Gain « on-off », gain sortie/entrée calculé, et gain expérimental obtenu dans un guide monomode de PMMA dopé par un complexe d'erbium. La concentration en masse d'erbium est de 1%.

c) Matériaux polymères amplificateurs à 1,55 μm : boîtes quantiques semiconductrices à base de chalcogénures de plomb. (Thèse de Laurent Badie)

Une coopération a démarré en 2005 entre le LPQM et le Technion Institute, Haïfa (Israël) (E. Lifshitz) sur les nanoparticules semi-conductrices de type PbS et PbSe pour l'émission laser et l'amplification dans le proche infrarouge. Ces nanoparticules ont pu être insérées dans une matrice polymère et l'amplification laser dans le proche IR (entre 1,2 et 1,6 μm) a été mise en évidence dans le matériau par émission spontanée amplifiée en régime de pompage continu à 980 nm, c'est-à-dire dans les mêmes conditions que pour les amplificateurs erbium. Des guides monomodes de PMMA dopés par des quantum dots de PbSe ont été élaborés au LPQM dans la salle blanche du Laboratoire. Les premiers résultats (voir Figure 5 dans le rapport de l'équipe Composants) montrent qu'il est possible d'obtenir un gain net nettement plus élevé (jusqu'à 2,7 dB/cm) que dans les guides polymères dopés erbium, avec un spectre d'amplification très large, couvrant toutes les bandes des transmissions optiques à 1,55 μm . Cependant, une évolution dans le temps a été observée dans ces matériaux : la luminescence et le gain de ces quantum dots se décalent fortement vers le visible au cours du temps. Le problème de la stabilité de ces nanostructures reste encore à résoudre.

d) Modélisation de l'orientation tout-optique de molécules de colorants photoisomérisables (M. Dumont)

Il s'agit de développer le modèle de cycle de pompage optique introduit en 1993-1995 et de mettre en évidence les conséquences de la saturation de ce cycle (interactions multiples de chaque molécule avec les champs). L'expression de la probabilité d'excitation non linéaire des molécules par l'interférence de deux champs fondamental et harmonique est reprise de façon quantique rigoureuse, les équations du cycle de photoisomérisation sont posées dans un formalisme tensoriel très général (molécules symétrie, quelconque, lumière de polarisation quelconque). Au premier ordre de perturbation, ces équations redonnent les propriétés géométriques développées par J. Zyss et S. Brasselet, mais, aux ordres supérieurs, de nombreux couplages apparaissent entre les composantes tensorielles de la distribution angulaire des molécules. Les propriétés tensorielles de la susceptibilité macroscopique non linéaire sont modifiées, ainsi que les propriétés géométriques de la génération d'harmonique par les molécules orientées. Ce résultat peut remettre en question certaines mesures anciennes de l'hyperpolarisabilité des molécules.

Cependant le formalisme général ne permet pas une résolution complète des équations et il a été nécessaire de recourir au calcul numérique, moyennant une simplification du modèle de rotation des molécules. Différents types de molécules ont pu être comparées (bâtonnet, octupolaires planes, octupolaires isotropes), avec différentes polarisations des champs. Les propriétés imposées par les symétries de la lumière et celles des molécules sont toujours conservées, mais toutes les autres relations tensorielles sont modifiées. L'évolution de certaines composantes de $\chi^{(2)}$ est très surprenante. On montre aussi que l'anisotropie induite par le pompage à un ou deux photons est très néfaste pour la construction de $\chi^{(2)}$. Seules les molécules octupolaires isotropes échappent à ce problème.

Une seconde partie de ce travail concerne la comparaison des modèles de redistribution angulaire lors du cycle de pompage optique. Pour cela le calcul a été réduit au cas de molécules axiales dans des champs eux-mêmes de symétrie axiale (la distribution angulaire ne dépend que d'un seul angle). Cette simplification permet d'introduire de nombreux modèles de rotation. On observe que tous les modèles trouvés dans la littérature donnent des résultats comparables et que l'expérience ne peut les distinguer. Le seul paramètre important est la rotation moyenne de la molécule pour un cycle de photoisomérisation: il détermine le temps nécessaire pour que l'orientation macroscopique atteigne son équilibre.

1 – 2 – 2 – 2 : Propriétés optiques de nanostructures hybrides *Emmanuelle deleporte, Jean-Sébastien Lauret, Radoslav Parashkov, Laetitia Doyennette, Antoine Bréhier, Sanjun Zhang, Gaétan Lanty*

Les activités du groupe sont centrées sur deux thèmes : les microcavités « hybrides » en régime de couplage fort et les nanotubes de carbone.

a) Microcavités hybrides en régime de couplage fort

Le groupe « propriétés optiques de nanostructures hybrides » s'attache à étudier le couplage fort entre le champ électromagnétique confiné dans une microcavité planaire et l'exciton de puits quantiques hybrides organique-inorganique formés de molécules de pérovskites. En régime de couplage fort, les excitons et les photons forment des états mixtes : les polaritons de cavité, modes normaux séparés énergétiquement par le dédoublement de Rabi.

Les molécules de pérovskites

Les pérovskites sont des molécules de formule générique $(R-NH_3)_2MX_4$, où M est un ion métallique tel que Ge, Sn, Pb, X est un halogène tel que Cl, Br, I, et R une chaîne alkyle : $C_6H_5C_2H_4-$ ou $C_nH_{2n+1}-$. Les pérovskites se déposent par des méthodes très simples et peu coûteuses telles que la méthode d'évaporation de solvant ou par dépôt à la tournette, sur des substrats très divers. Lors du dépôt à la tournette, les interactions de Van der Waals entre les molécules sont responsables de la formation de nanocristaux formés d'une alternance de feuillets organiques constituées des chaînes carbonées R et de feuillets halogénures de métal constituées d'octaèdres formées à partir de MX_4 : voir figure 11a). Cette structure nanométrique bidimensionnelle auto-organisée confine fortement les fonctions d'onde électroniques³ : les feuillets organiques, d'épaisseur de l'ordre du nanomètre, constituent des barrières de potentiel (les couches organiques présentent une énergie de bande interdite dans l'ultraviolet), les feuilles MX_4 constituent des puits de potentiel d'épaisseur une fraction de nanomètre, et la différence d'énergie de bande interdite entre les 2 types de feuillets est de l'ordre de 3 eV.

³ D. B. Mitzi, K. Chondroudis, and C. R. Kagan, IBM J. Res. Dev. 45, 29 (2001)

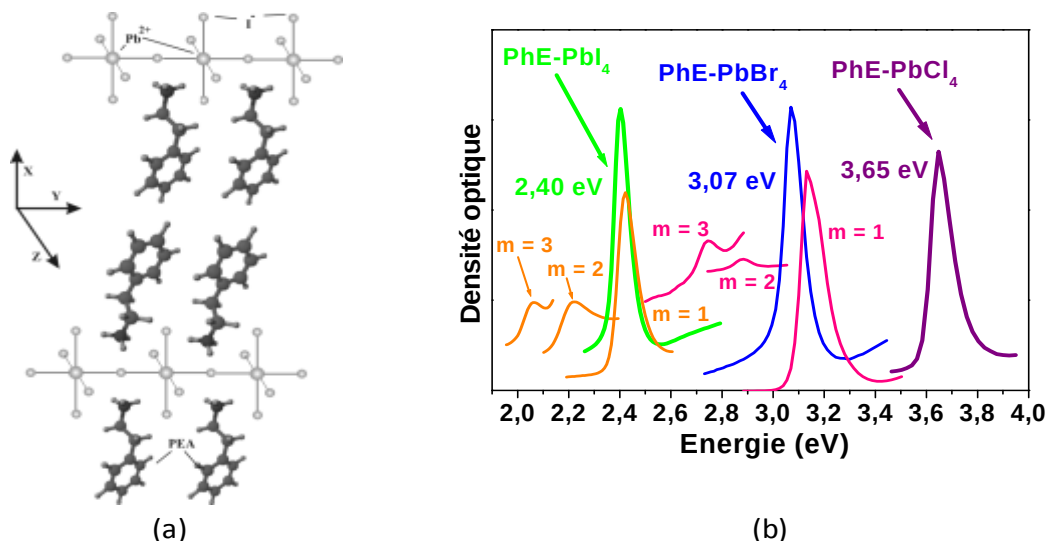


Figure 11: a) Exemple de molécules de pérovskites $[(C_6H_5C_2H_4)_2PbI_4]$; b) Spectres d'absorption de couches composées des différentes pérovskites synthétisées au LPQM et au PPSM.

On voit alors apparaître dans le spectre d'absorption des cristaux de pérovskite des pics d'absorption dans le visible ou le proche-UV selon la molécule étudiée, correspondant aux états électroniques confinés dans les feuillets MX_4 . Ce confinement est d'autant plus fort que les constantes diélectriques des deux types de feuillets sont très différentes. Par conséquent, l'énergie de liaison de l'exciton dans les pérovskites est particulièrement grande : de l'ordre de 200-300 meV (220 meV dans $(C_6H_5C_2H_4NH_3)_2PbI_4$)⁴ et l'extension spatiale de l'exciton est de l'ordre de grandeur de l'épaisseur de la feuille de MX_4 , c'est-à-dire de l'ordre du nanomètre (1.6nm pour $(C_6H_5C_2H_4NH_3)_2PbI_4$)).

Une propriété intéressante des pérovskites est que l'énergie de l'exciton peut être contrôlée facilement en jouant sur la nature des ions métalliques ou halogénures incorporés dans la molécule ainsi que sur la longueur de la chaîne carbonée. Par exemple, N. Kitazawa³ a montré que les excitons dans les pérovskites $(R-NH_3)_2PbX_4$ peuvent absorber du visible à l'UV selon que $X = I$ (508 nm), $X = Br$ (392 nm) ou $X = Cl$ (330 nm). On peut ajuster encore plus finement la longueur d'onde des excitons avec des matériaux tels que $(R-NH_3)_2Pb(Cl_xBr_{4-x})$ ou $(R-NH_3)_2Pb(Br_xI_{4-x})$. Le LPQM, en collaboration avec le PPSM, a synthétisé une dizaine de pérovskites différentes, qui couvrent une large gamme du spectre visible (2 eV) - proche UV (3,65 eV) (figure 11b)⁵.

Afin d'étudier plus en détail la structure électronique de ce puits quantiques naturels, des expériences de photoluminescence, de photoluminescence résolues en temps ainsi que d'excitation de la photoluminescence en fonction de la température (2K – 300K) sont en cours de réalisation dans le cadre d'une collaboration avec le Laboratoire de Photonique et Nanostructures (LPN). Les résultats seront corrélés à des mesures de rayons X effectuées également au LPN qui nous donneront des informations sur la structure de ces puits quantiques ainsi que sur l'efficacité de l'auto-organisation.

⁴ N. Kitazawa, Jpn. J. Appl. Phys. 35 6202 (1996); N. Kitazawa, Jpn. J. Appl. Phys. 36 2272 (1997).

⁵ Parashkov R, Bréhier A, Georgiev A, Bouchoule S, Lafosse X, Lauret J S, Nguyen C T, Leroux M and Deleporte E, 2007 Advanced Materials: Research Trends ed L A Basbanes (New York: Nova Science Publishers) chapter 4, pp 119–37.

Microcavités et molécules de pérovskites

Pérovskite visible

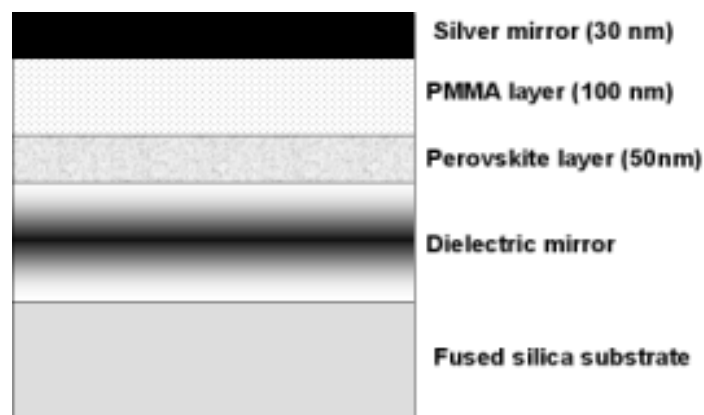


Figure 12 : Schéma d'une microcavité

Une couche de pérovskite ($(\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_2\text{CH}_2\text{NH}_3)_2\text{PbI}_4$ (émettant à 2,37 eV) est déposée sur un miroir diélectrique M1, la largeur de la microcavité est ajustée par dépôt d'une couche de PMMA d'épaisseur contrôlée, la cavité est fermée par un miroir M2 d'argent (figure 12). Les dépôts métalliques d'argent ont été réalisés au LPQM. La microcavité ainsi obtenue a tout d'abord été étudiée par spectroscopie de réflectivité résolue en angle (figure 13 gauche). La variation de l'angle d'incidence permet en effet d'ajuster l'énergie du mode de la cavité avec l'énergie de l'exciton des pérovskites. Ces expériences ont permis de mettre en évidence le couplage fort entre le mode de la cavité et l'exciton des pérovskites.

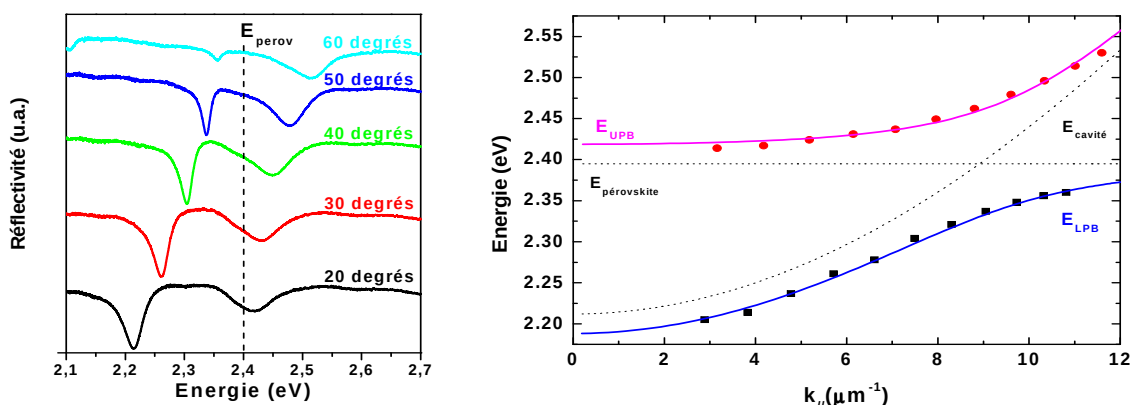


Figure 13 : (Gauche) Spectres de réflectivité de la microcavité contenant une couche de nanocristaux de pérovskites, pour différentes valeurs de l'angle d'incidence. (Droite) Courbe de dispersion des polaritons de cavité ; Simulations (traits pleins), points expérimentaux (carrés)

La figure 13 (droite) montre l'anti-croisement caractéristique du couplage fort entre les branches hautes énergie et basse énergie. Cela nous permet d'extraire une valeur du dédoublement de Rabi de 150 meV⁶. Des études de spectroscopie de photoluminescence résolue en angle ont permis de confirmer ces résultats⁷. Le régime de couplage fort entre l'exciton de la pérovskite et un mode de photon a également été démontré dans un autre type de configuration. Notre collaboration avec le LPMCN de l'université de Lyon nous a permis de démontrer le régime de couplage fort avec un mode de plasmon de surface de l'argent⁸. Depuis nous travaillons avec cette configuration dans le cadre de l'ANR PNano SCOP, dans le but d'explorer les possibilités d'injection électrique des pérovskites.

Pérovskite UV

⁶ A. Brehier, R. Parashkov, J.-S. Lauret and E. Deleporte, Appl. Phys. Lett. 89, 171110 (2006).

⁷ G Lanty, A Bréhier, R Parashkov, J S Lauret and E Deleporte, New Journal of Physics 10, 065007 (2008).

⁸ C. Symonds, J. Bellessa, and J. C. Plenet, A. Brehier, R. Parashkov, J.-S. Lauret and E. Deleporte, Appl. Phys. Lett. 90, 091107 (2007).

D'autres microcavités fonctionnant en régime de couplage fort ont été réalisées à l'aide de molécules de pérovskites émettant dans le proche ultraviolet ($(\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_2\text{CH}_2\text{NH}_3)_2\text{PbCl}_4$). Ces microcavités ont été étudiées à l'aide d'expériences de réflectivité et de photoluminescence. La figure 14 représente la courbe de dispersion des polaritons et est caractéristique du régime de couplage fort. L'ajustement à l'aide du modèle à deux niveaux permet de déduire un dédoublement de Rabi de 230 meV⁹.

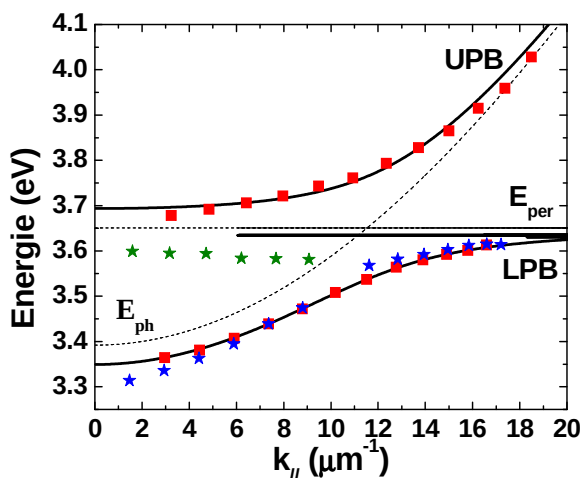


Figure 14: Courbe de dispersion des polaritons de cavité ; Simulation (traits pleins), points expérimentaux (réflectivité : carrés ; photoluminescence : étoiles)

Microcavité hybride

Agranovich et al¹⁰ ont suggéré une structure dans laquelle on pourrait combiner les avantages des semiconducteurs (possibilité de l'injection électrique) et des organiques (grande efficacité d'émission) : une microcavité hybride inorganique/organique, qui serait composée d'une couche organique et d'une couche inorganique insérées entre deux miroirs, et dont les excitons sont en résonance. Dans une telle microcavité hybride en régime de couplage fort, de nouveaux états, appelés polaritons hybrides, sont susceptibles de se former à partir d'une superposition cohérente des états du photon, de l'exciton du semiconducteur inorganique, et de l'exciton du matériau organique. Les excitons injectés électriquement dans les couches inorganiques pourront alors transférer rapidement leur énergie aux états les plus émissifs, qui sont ceux de la composante organique de l'état mixte, évitant ainsi l'émission de phonons acoustiques susceptibles de ralentir le processus de relaxation. On s'attend alors à une durée de transition radiative globale beaucoup plus courte dans une structure hybride que dans une structure semiconductrice. De plus, le renforcement de la population de l'état polariton organique pourra vraisemblablement déclencher une relaxation stimulée des excitons vers cet état. Une telle microcavité hybride présente donc un grand intérêt non seulement pour la réalisation de sources de lumière efficaces et très rapides, mais pourrait aussi dans l'avenir former la base d'un laser à polariton organique.

Nous avons réalisé une microcavité couplant les excitons de deux matériaux moléculaires différents en collaboration avec l'Université de Sheffield¹¹. Des microcavités couplant deux excitons inorganiques différents ont déjà été réalisées depuis plusieurs années par des laboratoires travaillant sur les semiconducteurs inorganiques. Mais, à l'heure actuelle, aucune microcavité couplant des excitons moléculaires et inorganiques n'a encore été réalisée. Dans le cadre du projet ANR PNano MICHRY, le groupe travaille à la réalisation d'une microcavité hybride contenant des pérovskites UV et une couche de GaN. La première microcavité Hybride vient d'être fabriquée et commence à être étudiée.

b) Nanotubes de carbone

Depuis avril 2007, le groupe « propriétés optiques de nanostructures hybrides » étudie l'influence du « dopage » sur les propriétés électroniques des nanotubes de carbone. Le « dopage » peut se faire de deux

⁹ G. Lanty, J. S. Lauret, E. Deleporte, S. Bouchoule, and X. Lafosse, Appl. Phys. Lett. 93, 081101 (2008)

¹⁰ V.M. Agranovich et al, Solid State Comm. 102, 63 (1997).

¹¹ J. Wenus, R. Parashkov, S. Ceccarelli, A. Brehier, J.-S. Lauret, M. S. Skolnick, E. Deleporte and D. Lidzey, Phys. Rev. B 74, 235212 (2006)

façons différentes. La première est un dopage de type physique au cours duquel des atomes donneurs et/ou accepteurs d'électrons viennent se substituer à des atomes de carbone lors de la synthèse. Les études centrées sur cette première voie n'ont débuté qu'au mois de janvier 2008 avec le projet ANR Pnano CEDONA et ne seront donc abordées que dans la partie perspective. La deuxième voie explorée au laboratoire est un dopage de type chimique au cours duquel on met les nanotubes de carbone en présence de molécules qui vont se fixer sur la paroi des nanotubes de façon non-covalente. Les molécules qui ont été étudiées ici sont des molécules de porphyrine.

Nanotubes de carbone utilisés

Les nanotubes de carbone utilisés sont synthétisés par dépôt chimique en phase vapeur à l'aide d'un catalyseur particulier qui est un alliage de cobalt et de molybdène. Ces nanotubes nous sont fournis gracieusement par D. Resasco (Université d'Oklahoma). Leur diamètre moyen est centré autour de 0,8 nm. La position de la transition optique fondamentale des nanotubes de carbone étant en première approximation proportionnelle à l'inverse du diamètre du nanotube, celles des nanotubes CoMoCat se situent entre 1,46 eV et 1,18 eV, ce qui permet d'étudier leur émission de lumière à l'aide de détecteurs silicium. La figure 15a) présente le spectre d'absorption de ces nanotubes en suspension à l'intérieur de micelles aqueuses. On distingue plusieurs transitions notées E11, E22, M11 qui représentent respectivement les transitions excitoniques fondamentales et excitées des nanotubes semi-conducteurs et la transition fondamentale des nanotubes métalliques. La figure 15b) représente le spectre de photoluminescence de la même suspension de nanotubes excitée à 2,331 eV. Le spectre de photoluminescence est composé de quatre raies qui correspondent à quatre familles différentes de nanotubes semi-conducteurs.

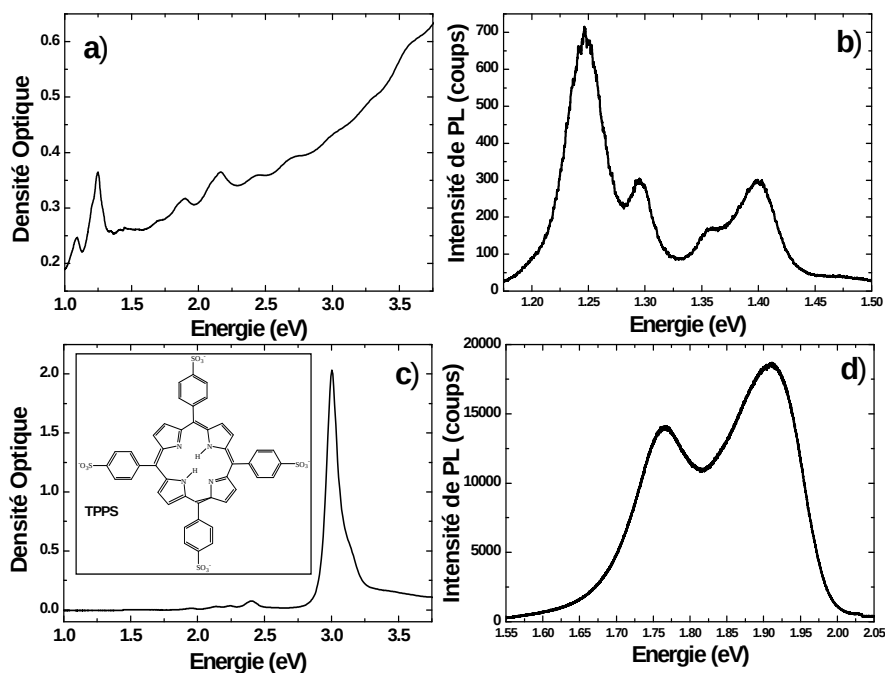


Figure 15 : a) Spectres d'absorption d'une suspension de nanotubes encapsulés en micelles. b) Spectre de photoluminescence de la même suspension de nanotubes excitée à 2,331 eV. c) Spectre d'absorption de molécules de porphyrine (TPPS) soluble dans l'eau. Encart : formule de la molécule de porphyrine. d) Spectre de photoluminescence de molécules de porphyrines excitée à 3 eV.

Molécules de porphyrines

La formule développée de la porphyrine utilisée lors de ces études est représentée dans l'encart de la figure 15c). Il faut noter que les groupements phényles sont en réalité à 90° du plan du macrocycle pour une porphyrine libre en solution. Les groupements SO₃⁻ assurent la solubilité de la molécule dans l'eau. Le spectre d'absorption de molécules de porphyrines libres en solution dans un tampon à PH 8 est représenté sur la figure 15c). Ce spectre est dominé par la bande de Soret des porphyrines centrée autour de 3 eV. On distingue à plus basse énergie l'absorption des bandes Q. Le spectre de photoluminescence (figure 15d) de la solution de molécules de porphyrines montre deux raies à 1,77 eV et 1,91 eV.

Dopage des nanotubes

Les nanotubes de carbone sont mis en présence des molécules de porphyrine dans le tampon à PH 8 et le mélange est soumis à une sonication intense durant 2h puis une sonication douce pendant 2h également. A la suite de la sonication, la suspension est centrifugée pendant 10 minutes à 120 000g afin d'éliminer les plus grosses particules et de ne garder uniquement en solution que les nanotubes individualisés « dopés » par les molécules de porphyrines. Ces suspensions sont stables à l'échelle de la semaine.

La figure 16a) représente le spectre d'absorption de ce type de suspension pour différentes concentrations de porphyrines (masse porphyrine/masse de nanotubes) dans la région spectrale d'absorption des molécules de porphyrines. La courbe en pointillés correspond à l'absorption de la porphyrine libre. On observe un décalage vers le rouge (120 meV) de la bande de Soret des porphyrines. Sur la courbe correspondant à une concentration en porphyrines de 72%, on observe un épaulement à 3eV correspondant à l'absorption de la porphyrine libre. A partir de ce type de concentration, la suspension de nanotubes est saturée en porphyrines et les porphyrines en excès restent donc libres en solution. Le décalage vers le rouge de la bande de Soret est une première indication de l'interaction entre les porphyrines et les nanotubes de carbone.

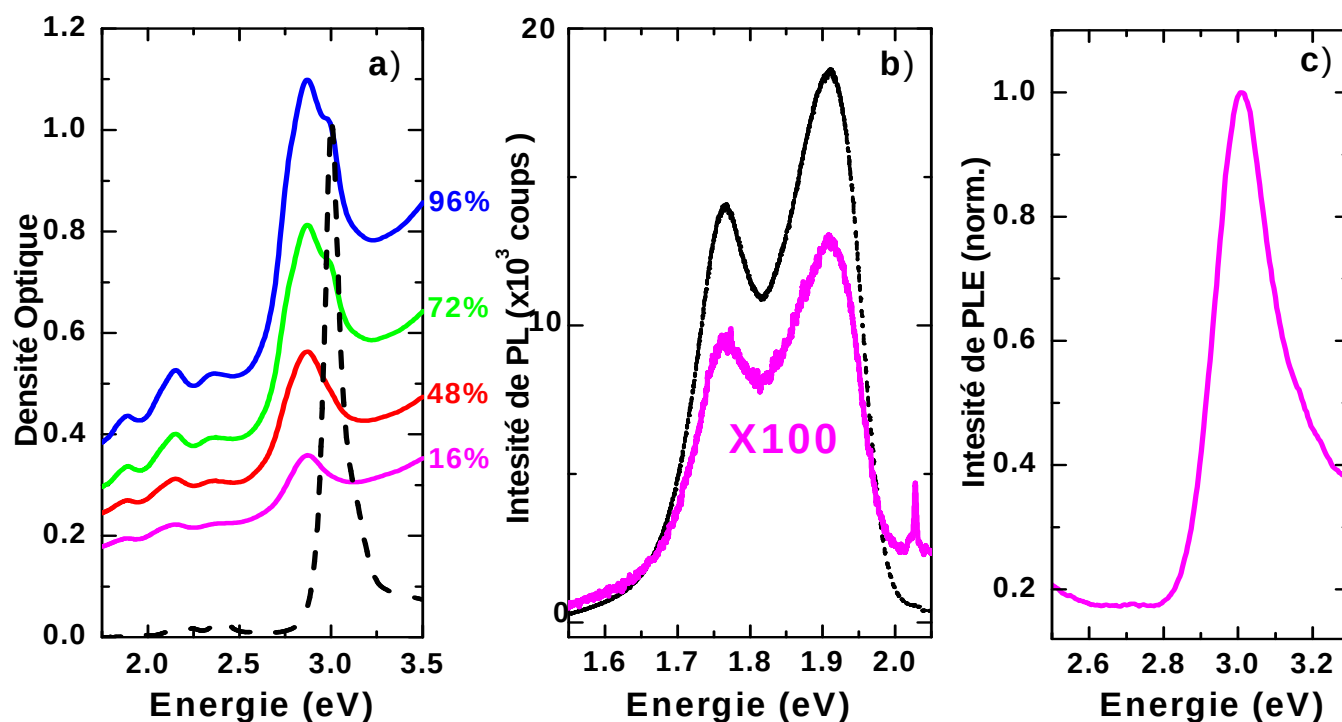


Figure 16: Région spectrale de l'absorption des porphyrines. a) Spectres d'absorption d'une suspension de nanotubes pour différentes concentrations en porphyrines. Courbe en pointillés : absorption d'une solution de porphyrines libres. b) Spectres de photoluminescence excités à 2,331 eV de la solution de porphyrine libre (noire) de la suspension de nanotubes/porphyrine 16% (rose). c) Spectre d'excitation de la photoluminescence d'une suspension nanotubes/porphyrines détecté à 1,77 eV.

Les spectres de photoluminescence d'une solution de porphyrines libre et d'une suspension de nanotubes/porphyrines, pour la même concentration en porphyrines, sont représentés sur la figure 16b). Lorsque les porphyrines sont mises en présence des nanotubes, 99% de leur luminescence est éteinte. Afin de connaître l'origine de la luminescence résiduelle, un spectre d'excitation a été effectué en détectant la variation d'intensité de la raie à 1,77eV en fonction de la longueur d'onde d'excitation (figure 16c). Le spectre d'excitation montre une résonance centrée à 3eV qui correspond à l'énergie d'absorption des porphyrines libres. De plus, lorsque la même expérience est réalisée sur une solution de porphyrines libres, la même signature spectrale est observée. Ces expériences permettent de conclure que la luminescence résiduelle observée sur la suspension de nanotubes/porphyrines est due à un résidu de porphyrines libres en solution. Le corollaire est que lorsque les porphyrines sont attachées aux parois des nanotubes, elles n'émettent plus de lumière. Cette observation est une preuve évidente d'une forte interaction entre les molécules de porphyrines et les nanotubes de carbone.

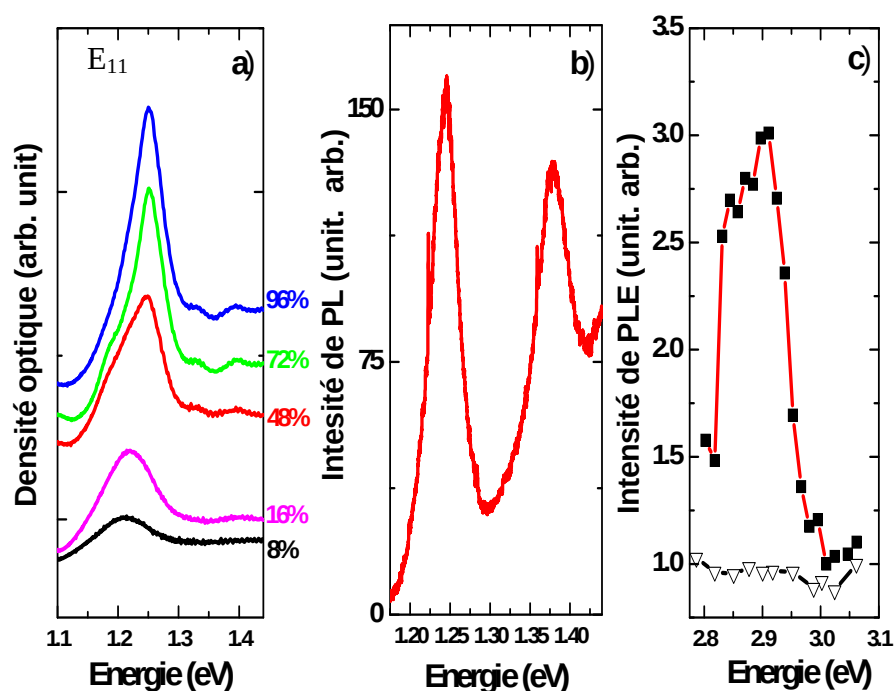


Figure 17: Région spectrale de l'absorption des nanotubes de carbone. a) Spectres d'absorption d'une suspension de nanotubes pour différentes concentrations en porphyrines. b) Spectres de photoluminescence excités à 2,331 eV de la suspension de nanotubes/porphyrine 48%. c) Spectre d'excitation de la photoluminescence de la suspension nanotubes/porphyrines détecté à 1,246 eV.

Le même type de spectroscopie a été réalisé dans la zone d'absorption des nanotubes de carbone. Sur la figure 17a), les spectres d'absorption en fonction de la concentration en porphyrine montrent que la raie d'absorption correspondant aux transitions E_{11} est mieux résolue au fur et à mesure que la concentration en porphyrine augmente. La conclusion de cette observation est que les molécules de porphyrines aident à la mise en suspension des nanotubes de carbone. La figure 17b) représente le signal de photoluminescence des nanotubes « dopés » par les molécules de porphyrine. Tout d'abord, le fait d'observer la luminescence de ces nanotubes fonctionnalisés permet d'affirmer que leur caractère d'objet unidimensionnel a été conservé contrairement à d'autres types de dopages comme la fonctionnalisation covalente qui éteint la luminescence des nanotubes. D'autre part, seules deux raies de photoluminescence sont observées alors que le spectre des nanotubes encapsulés en micelles en présentait quatre. Cette observation nous amène à penser que les molécules de porphyrines s'attachent préférentiellement sur certaines familles de nanotubes et pas sur d'autres. Les raisons de cette sélectivité restent encore à déterminer. Enfin, un spectre d'excitation de la photoluminescence a été effectué en excitant la suspension de nanotubes/porphyrine dans la région spectrale d'absorption des porphyrines et en détectant à l'énergie d'émission des nanotubes de carbone (figure 17c). Sur cette figure, les triangles ouverts représentent le spectre d'excitation d'une suspension de nanotubes encapsulés en micelles : aucune résonance n'est observée. La courbe en carrés pleins représente le résultat de la même expérience réalisée cette fois-ci sur la suspension nanotubes/porphyrine. Une résonance très marquée est observée autour de 2.9 eV, ce qui correspond à la raie d'absorption des porphyrines lorsqu'elles sont attachées à la paroi des nanotubes (cf figure 16a)). Ceci signifie que lorsqu'un photon est absorbé par la molécule de porphyrine, cette excitation est transférée au nanotube et la recombinaison radiative se fait sur les niveaux du nanotube¹². Les phénomènes mis en jeu dans ce transfert ainsi que la nature même de ce transfert restent encore à élucider.

¹² Gurvan Magadur, Jean-Sébastien Lauret, Valérie Alain-Rizzo, Christophe Voisin, Philippe Roussignol, Emmanuelle Deleporte, and Jacques A. Delaire, ChemPhysChem 9, 1250-1253 (2008)

1 – 2 – 3 – Equipe « Nano-photonique non linéaire et bio-photonique » (D. Chauvat, S. Brasselet, N. Sandeau, J. Zyss, H. Moizisova, B. Hajj, M. Zielinski)

L'exercice 2005-2008 a vu le départ de Sophie Brasselet en septembre 2006 pour l'Institut Fresnel à Marseille. Une collaboration étroite s'est immédiatement établie entre le nouveau laboratoire de Sophie Brasselet et le LPQM. Le recrutement définitif de Dominique Chauvat, auparavant en délégation CNRS au sein de l'équipe Nanophotonique Quantique, en septembre 2007, a été immédiatement accompagné de la formation d'une nouvelle équipe de Nanophotonique Moléculaire et Biophotonique : J. Zyss (Professeur et directeur de l'Institut d'Alembert), D. Chauvat (maître de conférences ENS Cachan), B. Hajj, physicien (thèse 2007-2010), M. Zielinski, physico-chimiste (thèse 2007-2010) et Halina Moizisova, biophysicienne (postdoctorat novembre 2007 – novembre 2009). Les objectifs de l'équipe concernent la mise au point de nouvelles techniques de microscopie non-linéaire et leurs applications en physique, chimie et biologie en s'appuyant très fortement sur la synergie des laboratoires présents au sein de l'Institut d'Alembert. En particulier, nous avons différents projets en biologie en collaboration avec plusieurs partenaires du laboratoire de biologie (LBPA). Le rapprochement spatial des laboratoires permet par exemple de préparer des lignées de cellules au LBPA puis de les étudier avec le microscope à deux photons au LPQM. Il en va de même avec les laboratoires de chimie (PPSM) et de microfluidique (SATIE). Cette nouvelle équipe bénéficie bien sûr des savoir-faire issus des nombreux travaux de Sophie Brasselet, et des expériences menées récemment dans l'équipe Nanophotonique Quantique (J.-F. Roch) du LPQM, dont D. Chauvat fait aussi partie (voir plus loin le rapport de cette équipe). Au terme de cette première année, nous avons lancé un grand nombre de collaborations et des premiers résultats, exposés ci-dessous sont en cours de soumission.

1 – 2 – 3 – 1 : Microscopie bi-photonique femtoseconde pour l'étude de micro- et nano-structures

Nous avons étendu l'expérience de microscopie non-linéaire développée dans les années précédentes à l'investigation de l'ordre moléculaire dans des échantillons préparés par des collègues chimistes.

1 – 2 – 3 – 1 – 1 : Etude de microcristaux organiques

Une collaboration avec l'Université de Tübingen (Allemagne) qui développe des co-cristaux de PHTP (perhydrotryphénylène) dopés de molécules non-linéaires nous a permis d'évaluer la potentialité de leurs matériaux pour la génération de second harmonique. Une étude quantitative a permis de montrer la forte efficacité de ces co-cristaux, et une étude polarimétrique a permis de montrer que ces cristaux possèdent peu de défauts (identifiés comme étant non mono-cristallins par réponse en polarisation non-linéaire). Un exemple d'imagerie de ces structures est illustré par la Figure 18.

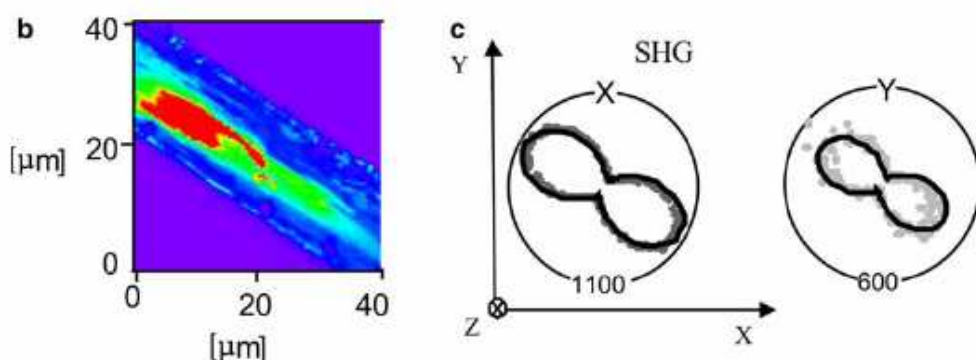


Figure 18 : Image SHG d'un co-cristal PHTP-DANS placé dans le plan de l'échantillon, et image polarimétrique correspondante pour un point typique de l'échantillon montrant l'ordre 1D des molécules dans ce cristal. Tiré de K. Komorowska et al., Chem Phys (2005).

D'autre part, une collaboration avec l'Université de Séoul (Corée du Sud) nous a permis d'étendre les mesures précédemment effectuées sur des macro-cristaux à des systèmes plus adaptés à la fabrication de composants (films cristallins) ou de nano-sondes (micro-cristaux à nano-cristaux). Ces études ont confirmé la potentialité de cristaux de symétrie d'ordre 3 (octupolaires) pour l'optique non-linéaire, de part leur grande efficacité. La fabrication de films minces a cependant montré que les molécules planes octupolaires se disposaient perpendiculairement au plan du film, ce qui impose de travailler à grande incidence pour pouvoir bénéficier des avantages qu'offre cette symétrie (voir Figure 19)..

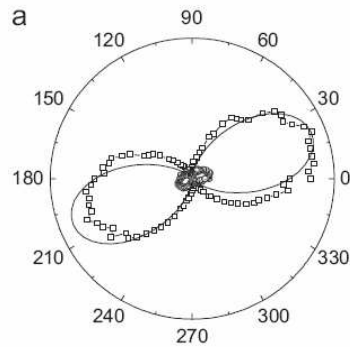


Figure 19 : Image en microscopie de transmission polarisée d'un film cristallin formé de molécules octupolaires et étude polarimétrique correspondante par SHG prise en un point de l'échantillon, montrant par sa caractéristique dipolaire que les molécules s'orientent perpendiculairement au plan d'échantillon. Tiré de Mi-Yun Jeong et al. *Adv Mater* (2007)

1 – 2 – 3 – 1 – 2 : Etude de nanostructures hybrides à constituant non linéaire organique

Une collaboration déjà mise en place avec le laboratoire de René Clément (Université d'Orsay) durant l'exercice précédent nous a permis d'étudier de nouveaux systèmes pour l'optique non-linéaire aux échelles nanométriques, constitués de nanoparticules hybrides inorganiques/organiques de taille de l'ordre de 10nm (Figure 20). Les études d'imagerie par microscopie non-linéaire et de polarimétrie ont montré que ces particules ont malheureusement tendance à s'agréger pour en former de plus grosses, de diamètre de l'ordre de 50nm.

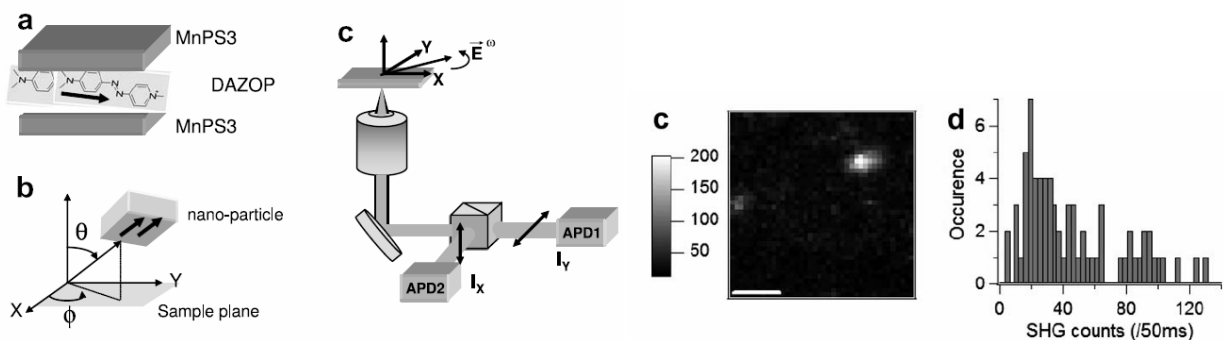


Figure 20 : Structure des nanoparticules hybrides (a) et schéma du microscope non-linéaire polarisé (b). c-d : image SHG obtenue et dispersion de l'intensité mesurée, qui permet de remonter à la taille des particules attendues. Tiré de E. Delahaye et al. *Chem Phys Lett* (2005)

1 – 2 – 3 – 1 – 3 : Particules inorganiques à non linéarités quadratiques

Suite aux études réalisées sur les nanoparticules organiques, puis plus récemment de KTP (voir bilan équipe nanophotonique quantique), il apparaît intéressant d'augmenter le panel des nanoparticules non-linéaires disponibles, en particulier quand elles sont capables de générer un champ de second harmonique (GSH) intense et stable. Ces nanoparticules peuvent à la fois montrer des propriétés physiques nouvelles, ou bien posséder une non-linéarité intrinsèque suffisante pour pouvoir utiliser des tailles très petites, de l'ordre de 10 nm. De telles nanoparticules deviennent alors compatibles avec l'étude de certains processus biologiques ou permettent d'envisager des sondes de champ électromagnétique de très haute résolution spatiale.

a) Nanoparticules semiconductrices : CdTe

En collaboration avec Dan Oron au Weizmann Institute of Science (Israël), nous nous sommes intéressés à des nanoparticules de CdTe, matériau semi-conducteur non-centrosymétrique connu pour montrer une très forte non-linéarité sous forme massive. Nous avons en effet pu observer la GSH de nanoparticules de 10 nm (voir Figure 21). Hormis la très petite taille de ces nanoparticules, la structure cristalline possède une symétrie différente de celle des nanocristaux de KTP. De plus, la longueur d'onde d'excitation peut être optimisée avec apparition de résonance lié au confinement quantique pour les signaux de SHG. Un travail est en cours pour fonctionnaliser ces nanoparticules. Cette étude s'étudie dans le cadre du tout nouveau Laboratoire Européen Associé (LEA) Weizmann-CNRS.

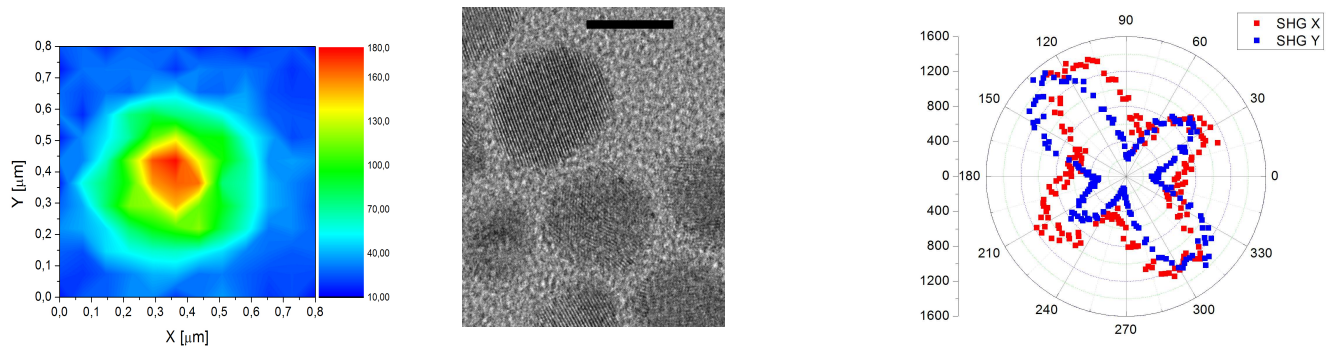


Figure 21 : Nanocristaux de CdTe. (a) SHG d'une nanoparticule isolée, (b) Image par microscopie électronique en transmission (Dan Oron) (échelle = 10 nm), (c) Réponse en polarisation.

b) Titanate de baryum

D'autres nanoparticules non-linéaires mieux connues comme le titanate de baryum BaTiO_3 ont aussi été étudiées (collab. Natalie Doss, Joe Perry, Georgia Tech. USA). Similaires aux nanocristaux de KTP, elles génèrent des champs de GSH confortables pour des tailles de l'ordre de 100 nm et montrent une symétrie cristalline différente de celle du KTP.

Aujourd'hui nous disposons donc déjà d'un choix varié de nanocristaux actifs en GSH résonante ou non-résonante propres à l'Institut d'Alembert et ses collaborateurs, et, au-delà de l'étude de leurs propriétés physiques, nous nous orientons vers l'utilisation de ces nanocristaux comme sondes.

1 – 2 – 3 – 2 : Développement de nouvelles techniques de microscopie non-linéaire

L'expérience de polarimétrie non-linéaire dont on a vu ci-dessus quelques réalisations est fondamentalement limitée par la nature 2D des observations. Cette expérience, basée sur une variation de l'état de polarisation d'excitation dans le plan de l'échantillon, ne donne en effet des renseignements sur des orientations « hors plan » que dans des cas particuliers d'échantillons riches en symétries. Pour compléter cette étude et l'étendre à des investigations de couplages champ-matière dans la direction axiale de l'excitation, une nouvelle expérience a été mise en place. Celle-ci se base sur l'imagerie défocalisée introduite quelques années plus tôt dans le contexte de la mesure d'orientation de molécules fluorescentes isolées. Elle consiste à produire sur une caméra CCD défocalisée par rapport au plan image du microscope l'image du signal émis par un nano-objet : cette image contient, dans sa morphologie, des informations précieuses sur l'orientation 3D du dipôle non-linéaire induit généré dans ce nano-objet.

Récemment nous avons développé l'imagerie défocalisée de la génération de seconde harmonique de cristaux isolés de KRiOPO_4 (KTP) (Figure 22) en collaboration avec le groupe de nanophotonique quantique (voir plus loin) dans le cadre de la thèse de Loc Le Xuan et le postdoctorat de Nicolas Sandeau. Nous étudions actuellement la possibilité d'élargir le domaine d'application de cette méthode à la fluorescence à deux photons, ainsi qu'à des structures bidimensionnelles (un film de molécules) ou tridimensionnelles (un noyau).

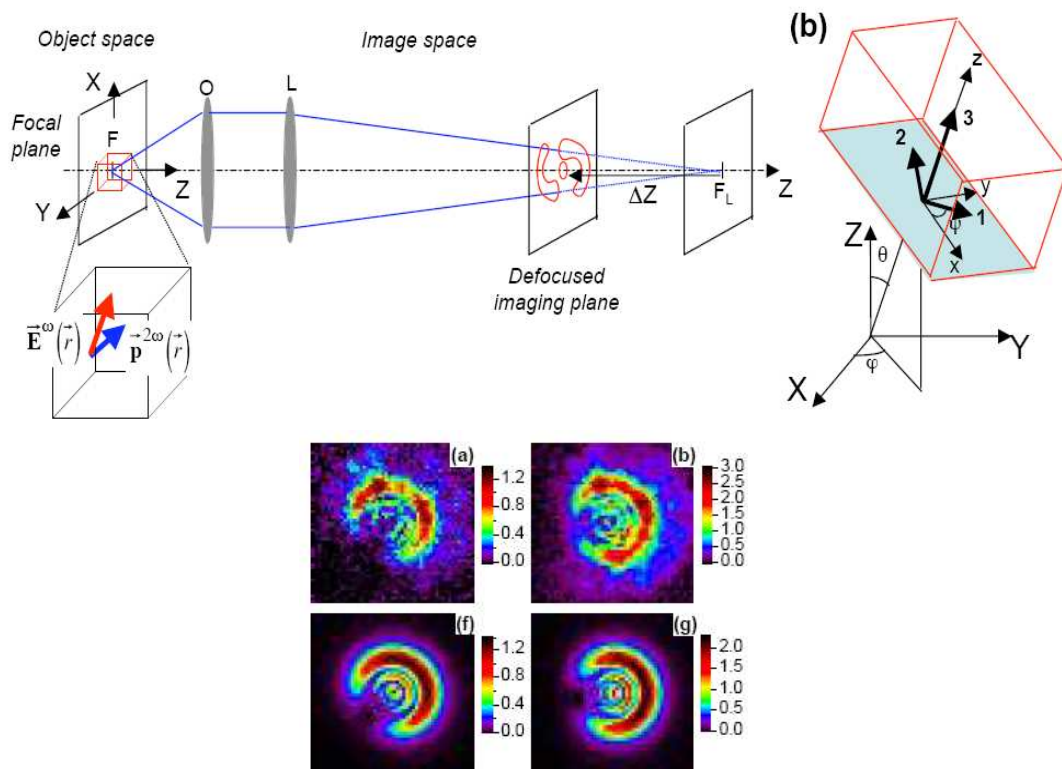


Figure 22 : Principe de l'imagerie défocalisée (en haut) et mesure sur un nano-cristal de KTP de 80nm de diamètre isolé au centre du point focal de l'objectif d'excitation : la mesure s'effectue en réflexion. L'enregistrement de l'image défocalisée (en bas) pour différentes polarisations d'excitation (a-b) permet de remonter à l'orientation 3D du nanocristal par modélisation des champs rayonnés imagés (f-g). Images tirées de N. Sandeau et al. *Opt. Expr.* (2007)

1 – 2 – 3 – 3 : Manipulation optique

Les dernières observations sur l'orientation photo-induite de molécules fluorescentes isolées nous ont amené à rechercher des systèmes plus stables en fluorescence et manipulables non seulement en orientation mais également en position. Une collaboration a été mise en place dans le cadre d'une ANR avec le laboratoire SIRCOB dirigé par Chantal Larpent à l'Université de Versailles, qui synthétise des nano-particules de polystyrène de taille de l'ordre de 20nm, dopées par des fluorophores, et donc plus brillantes et plus photo-stables qu'une molécule isolée. Ces particules sont greffées en surface par une molécule dérivée du DR1 photoisomérisable. Nous avons démontré que le déplacement photo-induit de ces particules peut être généré par une illumination structurée spatialement sur un champ de 80 micromètres dans un échantillon de particules dispersées dans une matrice visqueuse de PVA. Une grille produisant des gradients locaux d'intensité a été projetée dans le plan de l'échantillon à une longueur d'onde de 473nm. Une illumination uniforme à 633nm est superposée à cette grille d'intensité afin de suivre, par fluorescence, le mouvement des particules.

Nous avons observé les premiers mouvements photoinduits avec des vitesses atteignant 10 microns/s, qui dépendent linéairement de l'intensité et du gradient à 473nm (Figure 23). Le phénomène observé est une diffusion Brownienne perturbée par une force extérieure provenant de la photoisomérisation des molécules en surface des particules, qui agissent ainsi comme des « nageoires » poussant les particules vers les minima d'intensité. Ce premier résultat encourageant nous amène à rechercher les conditions optimales pour réaliser le contrôle du déplacement optique d'objets allant en 10nm à 100nm en taille.

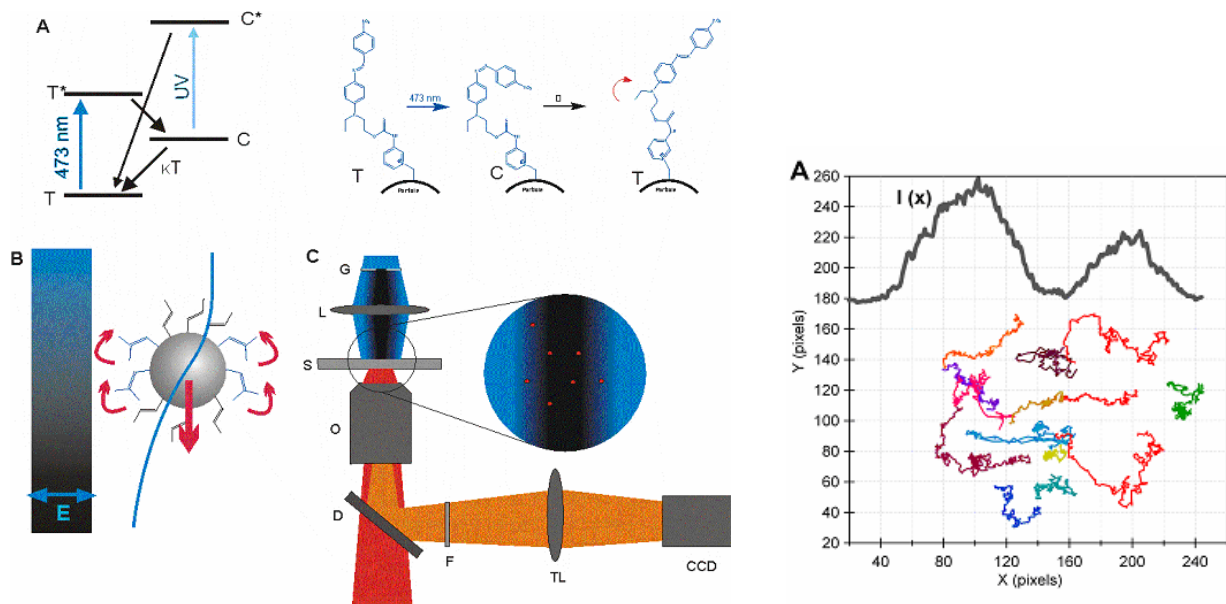


Figure 23 : Principe du photo-déplacement induit de nano-particules fluorescentes : A : structure moléculaire des molécules greffées et diagramme énergétique de la photoisomérisation, B : principe microscopique du déplacement, C : montage optique. A droite : quelques trajectoires de particules dont on voit qu'elles se déplacent suivant le gradient d'intensité montré en haut du graphe. Tiré d'une publication soumise.

1 – 2 – 3 – 4 : Etude de films moléculaires auto-organisés

En collaboration avec le laboratoire de Chimie (Elena Ishow, PPSM) de l'ENS Cachan, nous étudions la possibilité de structurer les propriétés non-linéaires de films moléculaires. Les molécules non-centrosymétriques ont été synthétisées au PPSM pour qu'elles s'auto-organisent d'une façon non-centrosymétrique lors du dépôt par évaporation des molécules. On aboutit alors à un film émettant spontanément de la GSH sous excitation femtoseconde. Ce film peut être structuré grâce à un autre champ lumineux à une longueur d'onde spécifique dont le rôle est de désorienter localement les molécules par changement de conformation. Des réseaux ont ainsi pu être photoinscrits et visualisés par mesure de la GSH structurée (Figure 24)

Au-delà des aspects applicatifs dans le domaine de l'inscription d'information et de nouveaux composants optiques de cette activité, ces films constituent un échantillon à deux dimensions modèle pour tester nos méthodes de microscopie sur des surfaces non-linéaires.

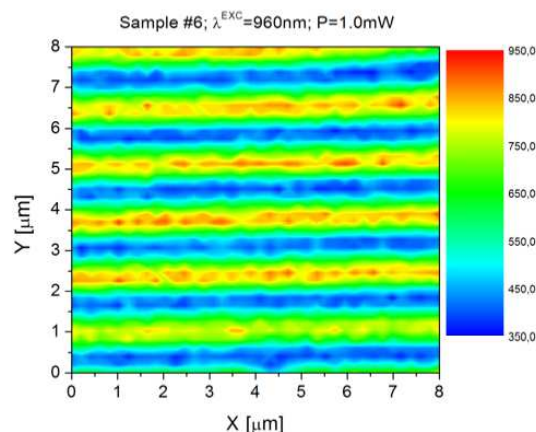


Figure 24 : Films auto-organisés puis photostructurés par illumination d'un réseau lumineux. On observe ici la relecture de ce réseau par un faisceau femtoseconde qui visualise le réseau de GSH (collaboration E. Ishow, PPSM).

1 – 2 – 3 – 5 : Vers l'étude de structures cellulaires

Un des objectifs majeurs de la collaboration LPBA-LPQM concerne la possibilité de visualiser l'organisation de l'ADN sous diverses formes, l'objectif ultime étant la compréhension des domaines chromatiniens au sein du noyau d'une cellule.

Tout d'abord nous avons pu réaliser des images par fluorescence à deux photons de noyaux de cellule (Fig. 25a). Ces signaux intrinsèques sont difficiles à interpréter, surtout si l'on veut rester en dessous du seuil de dommage de l'ADN. Pour tenter d'obtenir une information orientationnelle nous avons donc coloré l'ADN par des fluorophores qui s'attachent avec un angle spécifique à la fibre d'ADN. Cependant, la résolution nécessaire pour extraire une information sur une fibre de chromatine unique étant de 30 nm, nous avons encore simplifié l'objet d'étude en considérant des domaines de cristaux liquides qui se forment spontanément dans des solutions d'ADN concentré (Fig. 25b). Dans ce cas, en analysant les signaux de fluorescence à deux photons émis par les fluorophores, nous avons pu extraire l'orientation des fluorophores par rapport à l'ADN (Fig. 25c).

Nous avons aussi commencé l'étude de structures intrinsèquement non-linéaires dans la cellule comme les microtubules qui génèrent un signal de GSH sans marquage. Ces microtubules jouent un rôle essentiel dans le guidage des chromosomes lors de la division cellulaire (Fig. 25d) (collaboration avec François Treussart LPQM, et Patrick Curmi Univ. Evry).



Figure 25 : Imagerie biophotonique. (a) Fluorescence intrinsèque du noyau d'une cellule et (b) image lors de la mitose : microtubules au centre émettant de la GSH, (c) cristaux liquides d'ADN marqués, (d) Analyse en polarisation de l'orientation des marqueurs fixés sur l'ADN.

L'objectif de ces différentes études est de réussir à obtenir, grâce à la microscopie à deux photons pour la détection de signaux intrinsèques ou liés à un marquage, un paysage de la cellule et de son noyau pour ensuite y voir se déplacer un virus (ANR Imfovir, LBPA/LPQM).

1 – 2 – 3 – 6 : Microscopie électro-optique et applications

Pour des processus électroniques, l'origine des phénomènes électro-optiques est identique à celle de la génération de seconde harmonique. Mais la mesure des effets électro-optiques est complètement différente : il s'agit ici de mesurer un déphasage induit par un champ électrique quasi-statique. Ceci peut être réalisé avec une source laser continue de faible puissance et une méthode de détection interférométrique. Sur cette idée, une microscopie électro-optique a été démontrée (T. Toury et al. Optics Letters 2006).

Un tel microscope permet donc soit, en appliquant un champ électrique quasi-statique, de détecter des structures non-centrosymétriques et de compléter ainsi la microscopie GSH dans des conditions expérimentales très différentes, soit, si la nonlinéarité est connue, de mesurer des champs électriques statiques très localement. Cette dernière possibilité ouvre la voie à des applications biologiques.

Tout d'abord nous avons poursuivi le développement de cette nouvelle microscopie en réalisant des échantillons de référence en niobate de lithium (cf. Fig. 26a), et en améliorant le microscope (optique, mécanique, électronique). Nous tentons maintenant de l'appliquer dans plusieurs domaines. En collaboration avec Elena Ishow (PPSM), nous avons pu réaliser un premier modulateur électro-optique moléculaire sans poling, fondé sur l'utilisation d'un film moléculaire auto-orienté. Avec Natalie Doss (Georgia Tech.) des agrégats de nanoparticules ont pu être détectés.

Très récemment, en collaboration avec Bruno Le Pioufle (laboratoire SATIE de l'ENS Cachan), il a été possible de détecter l'effet électro-optique associé à une bimembrane artificielle colorée sur une seule couche par une assemblée de molécules non-linéaires (Figure 26 b et 26c). Ce résultat récent est encourageant pour les applications biologiques.

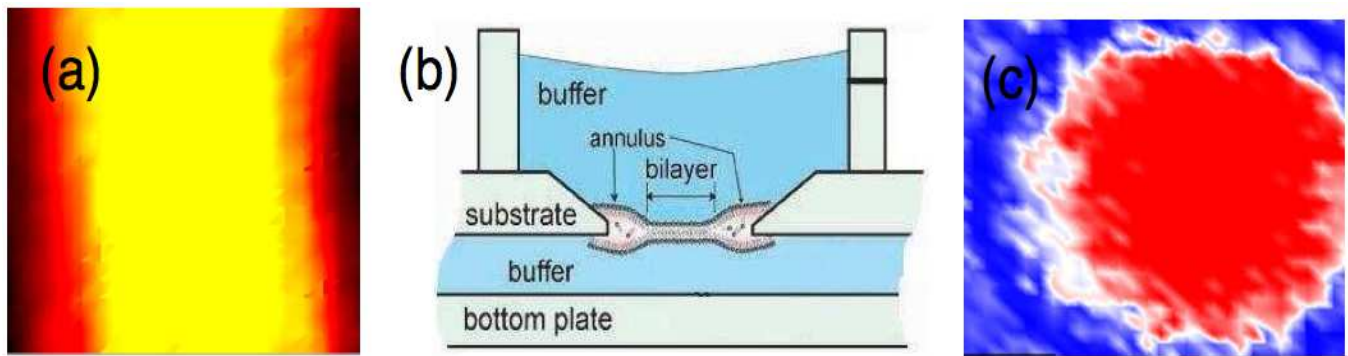


Figure 26. Microscopie électro-optique. (a) Signal uniforme issu d'un modulateur en niobate de lithium de référence, (b) bimembrane artificielle (collab. B. Le Pioufle SATIE), (c) signal électro-optique d'une bi-membrane artificielle colorée d'un seul côté par des molécules non-linéaires.

En conclusion, l'originalité de nos microscopies à deux photons réside sans doute dans le couplage unique entre la microscopie nonlinéaire de génération de seconde harmonique et la microscopie électro-optique, toutes deux pouvant s'appuyer sur les propriétés de cohérence optique des signaux émis.

1 – 2 – 4 – Equipe « Nano-photonique quantique » (J-F. Roch, F. Treussart, F. Grosshans, C. Zhou, V. Jacques, E. Wu, D. Zheng, O. Faklaris, A. Slablab, Loc Xuan Le, D. Chauvat)

Le travail de recherche de l'équipe de nanophotonique quantique est centré autour de l'étude et l'utilisation de l'émission d'objets de taille nanométrique. Les nano-objets actuellement étudiés, sont essentiellement des défauts ponctuels du diamant et des nanocristaux nonlinéaires, et leur émission nous sert à effectuer des tests fondamentaux de la physique quantique, à développer des protocoles de cryptographie quantique, mais aussi à caractériser le nanoémetteur lui-même.

1 – 2 – 4 – 1 : Tests fondamentaux de la mécanique quantique

Depuis 2003, l'équipe *Nanophotonique Quantique* a été essentiellement centrée sur l'étude de sources de photons uniques fondées sur la photoluminescence de défauts ponctuels dans le diamant, les centres NV, composés d'un atome d'azote et d'une lacune. Le diamant est un matériau isolant optiquement transparent dans le visible et le proche infrarouge. Sa synthèse, en particulier par procédé CVD, permet de contrôler la présence d'impuretés au sein du matériau. Ces impuretés peuvent conduire à la formation de centres colorés photoluminescents. Isolés à l'échelle du défaut individuel, ces centres colorés peuvent, via le contrôle temporel de leur excitation, émettre des impulsions contenant un photon et un seul, avec la propriété remarquable et unique d'être parfaitement photostables à température ambiante.

Dans le cadre de la thèse de Vincent JACQUES (2004 – 2007), nous nous sommes intéressés aux interférences à un photon. Dans un premier temps, nous avons reproduit l'expérience réalisée en 1986 par Philippe GRANGIER et Alain ASPECT en nous attachant à lui donner un aspect plus visuel en montrant directement sur une caméra CCD la formation des franges d'interférence photon par photon. Nous avons ensuite affiné l'expérience. En combinant la source à photon unique avec des composants opto-électroniques rapides, nous avons pu réaliser l'expérience « à choix retardé » qui avait été imaginée par John Archibald WHEELER dans les années soixante-dix et qui était restée jusqu'alors une expérience de pensée (« Gedanken Experiment »). Cette expérience, dont les résultats ont été publiés dans *Science* en 2007, sont en parfait accord avec les prédictions de la mécanique quantique. Elle montre le caractère paradoxal de la complémentarité de Bohr qui est souvent présentée comme une réponse facile aux difficultés conceptuelles de la dualité onde-corpuscule. Cette expérience a fait l'objet d'une médiatisation assez importante : brève du CNRS, article dans la revue *Science et Vie*, description dans des revues anglo-saxonnes et des sites web de vulgarisation scientifique, etc.

1 – 2 – 4 – 2 : Cryptographie Quantique

Les études d'émetteurs uniques dans le diamant ont porté quasiment exclusivement sur le centre coloré NV qui correspond à un complexe azote-lacune dans le réseau cristallin. Ces défauts sont créés à partir des impuretés d'azote qui s'insèrent durant la croissance du diamant synthétique ou bien par implantation d'atomes une fois la croissance de l'échantillon effectuée. Dans le cadre de la thèse de E. WU, nous avons identifié puis caractérisé à l'échelle d'émetteur individuel un autre type de défaut du diamant : le centre coloré associé au complexe nickel-azote NE8. Par rapport au centre coloré NV, le centre NE8 possède un spectre de photoluminescence fin et centré dans le proche infrarouge. Il apparaît ainsi comme

particulièrement prometteur au regard des applications pour les communications quantiques, dépassant un certain nombre de limitations imposées par le centre NV dans le système complet de cryptographie quantique que nous avons construit en 2004.

Nous avons étudié les propriétés de photoluminescence de ces centres colorés dans des lames de diamant naturel. En collaboration avec l'Université de Melbourne, nous avons récemment montré qu'il était possible d'incorporer des impuretés de nickel dans une matrice de diamant synthétisée par CVD dans un réacteur plasma, avec au final des propriétés de photoluminescence identiques à celles de ces mêmes centres colorés dans le diamant naturel. Ce résultat ouvre de nombreuses perspectives pour optimiser le rendement d'émission de la source de photon unique.

1 – 2 – 4 – 3 : Nanoparticules de diamant photoluminescentes pour le marquage en biologie

L'équipe *Nanophotonique Quantique* a pensé fin 2004 tirer profit de la parfaite photostabilité des centres colorés NV dans les nanoparticules de diamant plus petites que 50 nm pour s'en servir comme traceur en biologie, voire comme vecteur de biomolécules qui pourraient alors être suivies dans leur déplacement vers une cible cellulaire potentielle. Cette activité est supervisée par François TREUSSART qui encadre un doctorant (O. FAKLARIS, 2006-2009) sur ce sujet.

Notre travail comporte (i) l'optimisation de la concentration en centres colorés dans des nanoparticules de la plus petite taille possible (ii) l'imagerie des nanoparticules photoluminescentes dans les cultures cellulaires et la détermination des mécanismes de pénétration.

Concernant le point (i) nous travaillons en étroite collaboration avec les laboratoires impliqués dans les projets *Nano4Drugs* (FP6 LifeScience, 2006-2009) et *NaDia* (ANR PNANO 2007, coordonnée par F. TREUSSART). La concentration la plus élevée obtenue de façon contrôlée à cette date (irradiation par faisceau de protons de 2.4 MeV pour créer les lacunes « V », puis recuit sous vide ou gaz inerte), et mesurée au LPQM conduit à une moyenne de 3 centres par particules d'une taille de 25-30 nm. La Figure 27 présente une mesure réalisée au LPQM des tailles des nanoparticules de diamant utilisées. La Figure 28 montre la photoluminescence du même dépôt de nanoparticules de diamant sur une lame de verre et le nombre de centres colorés NV mesuré dans chaque nanoparticule.

Les caractérisations réalisées au LPQM ont été complétées par d'autres mesures en champ proche optique couplées à notre système de corrélations temporelles d'intensité. Ces dernières expériences ont été menées en collaboration avec l'équipe de Serge HUANT à l'Institut Néel (Grenoble) et ont donné lieu à une publication commune.

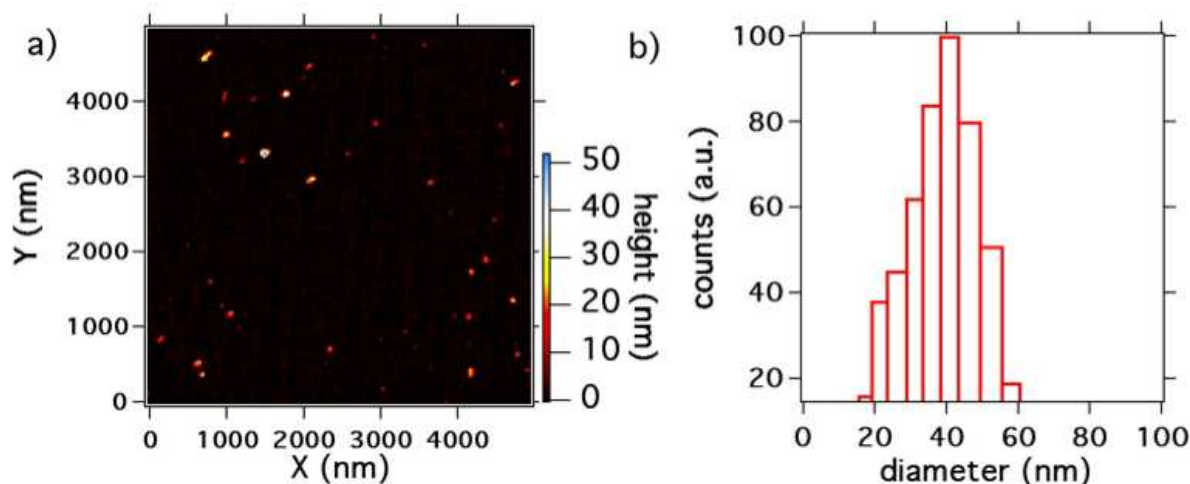


Figure 27 : Détermination de la distribution en tailles des nanoparticules de diamant. (a) Balayage par microscopie à force atomique d'un dépôt de nanoparticules sur lamelles de microscope. (b) Histogramme de la distribution en hauteur de nanoparticules, déduit du balayage (a).

Le travail en cours avec les équipes responsables des traitements physico-chimiques nécessaire à la création des centres NV comporte notamment des tests avec des faisceaux de particules plus lourdes susceptibles de créer plus de lacunes, et une optimisation du recuit. Pour les irradiations, nous sommes en relation étroite de longue date avec deux laboratoires pour les irradiations (LSI, Ecole Polytechnique ; CEMTHI, CNRS-Orléans) et avons initié d'autres contacts plus récemment (Institut des Microtechnologies Appliquées ARC IMA-Arc, Haute Ecole Arc Ingénierie, NEODE, Suisse) ; et pour les traitements physico-chimique

postérieurs nous collaborons avec deux laboratoires (recuit et désagrégation : PMC, Ecole Polytechnique ; LMSSMat UMR CNRS 8579, Ecole Centrale, JP BOUDOU).

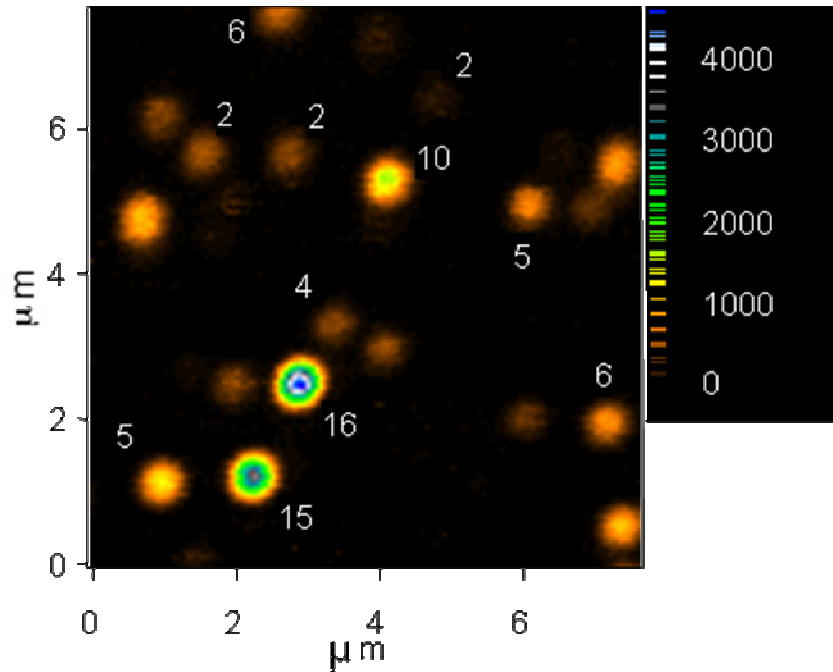


Figure 28 Photoluminescence d'un dépôt des nanoparticules de diamant caractérisées en taille dans la Figure 27. Les valeurs indiquées à proximité de chaque spot correspondent au nombre de centres colorés NV que contient la particule, mesuré par technique de corrélations temporelles d'intensité.

Concernant le point (ii), nous avons mis en évidence que les nanodiamants caractérisés précédemment pénétraient dans les cellules en culture (Figure 29). Le mécanisme d'internalisation n'est pas encore totalement élucidé. Nous avons pour l'instant mesuré que seulement 20% des nanoparticules internalisées au bout de 2 heures d'incubation étaient co-localisées avec des endosomes (donc probablement logées dans ces derniers). Ce travail a donné lieu à publication. Nous vérifions actuellement les autres voies d'internalisation.

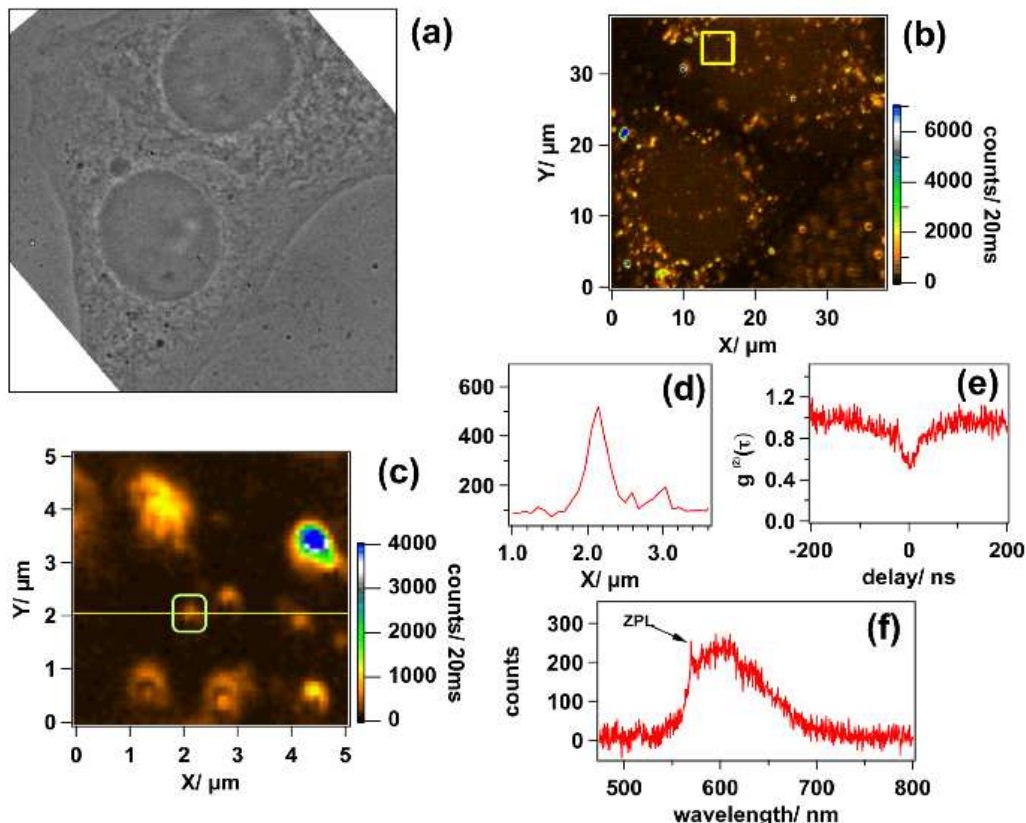


Figure 29 : Nanodiamants photoluminescents ayant pénétrés dans des cellules cancéreuses Hela: (a) Image obtenue par microscopie en contraste de phase montrant deux de ces cellules; (b) Image obtenue par microscopie

confocale à la hauteur $z=1500$ nm au dessus de la surface de la lamelle de microscope (longueur d'onde 488 nm, puissance 0.5 mW); (c) Zoom de la zone encadrée en jaune sur (b) ; (d) Profil d'intensité de photoluminescence de la nanoparticule entourée dans (c), FWHM=250 nm; (e) Fonction de corrélation temporelle d'intensité normalisée pour le même nanocristal, présentant un dégroupement de photons associé à l'émission de deux centres colorés NV (longueur d'onde 488 nm, puissance 0.5 mW) ; (f) Spectre de photoluminescence du même nanocristal correspondant à l'émission de la forme neutre de centre NV : NV(0) identifiée grâce à sa raie zéro phonon (ZPL) centrée sur la longueur d'onde de 575 nm.

1 – 2 – 4 – 4 : Non-linéarités optiques à l'échelle nanométrique

Pour de nombreuses applications en physique comme en biologie, l'émission de lumière issue de nanoparticules est utilisée pour sonder des surfaces ou des cellules. Dans le cadre de la microscopie non-linéaire à deux photons, la détection de fluorescence à deux photons est maintenant assez répandue. Il s'agit d'un processus résonant efficace, mais donc aussi souvent limité par des phénomènes thermiques ou de photoblanchiment. Ce processus est sans cohérence, c'est-à-dire sans relation de phase avec le faisceau d'excitation. Par ailleurs, pour des structures non-centrosymétriques, un second phénomène, la génération de seconde harmonique (GSH), peut coexister avec la fluorescence à deux photons. Le laboratoire a montré en 2004 que l'étude simultanée de ces deux effets permet d'extraire l'orientation relative de la structure cristalline d'une nanoparticule isolée. Cependant de nombreuses propriétés propres à la GSH n'avaient pas été exploitées. Par exemple la GSH peut être non-résonante, donc conduire à une émission de photons très stable, qualité recherchée pour une sonde. De plus, l'onde harmonique générée est cohérente avec l'onde excitatrice, ce qui permet d'envisager des méthodes de détection interférométrique. Cependant la génération de seconde harmonique est souvent peu efficace. Au cours de ces 4 dernières années, nous avons étudié la possibilité d'utiliser des nanocristaux nonlinéaires actifs en génération de seconde harmonique et développé les techniques de microscopie associées.

a) *Mise au point de nanocristaux non-linéaires de KTP pour la microscopie non-linéaire. Le Xuan Small (2008). Zhou Chin. Opt. Lett. (2007).*

La première étape a consisté à mettre à jour de nouveaux nanocristaux non-linéaires efficaces en GSH, même non-résonante. Nous sommes partis d'une idée simple. Des cristaux inorganiques comme le tytanyle phosphate de potassium (KTP) sont des matériaux bien connus, efficaces et résistants en optique non-linéaire « macroscopique ». Peut-on obtenir des nanocristaux de KTP ? Pour cela, en collaboration avec la société Cristal Laser en France et le Laboratoire LPMC de Polytechnique, nous avons d'abord trié des poudres de KTP issues de croissance par méthode par flux, puis il a même été possible de faire croître ces nanocristaux directement par méthode chimique. L'émission de GSH d'un nanocristal isolé de KTP d'une taille allant de 30 nm à 100 nm est d'une part facilement détectable dans un microscope à deux photons, mais aussi parfaitement stable pendant des heures.

b) *Polarimétrie non-linéaire et imagerie défocalisée de l'émission de seconde harmonique de nanocristaux non-linéaires Sandeau Opt. Expr. (2007).*

Le diagramme de rayonnement et la polarisation de la GSH émise par un nanocristal de KTP sont directement reliés à la polarisation du champ excitateur ainsi qu'à l'orientation en trois dimensions de la structure du nanocristal. Nous avons pu montrer que l'analyse polarimétrique de la GSH, associée à l'imagerie défocalisée du diagramme de rayonnement du nanocristal (Figure 30), méthode originale pour la GSH, permet d'extraire de façon précise ($\pm 5^\circ$) l'orientation des axes du nanocristal. La connaissance de cette orientation est cruciale pour l'utilisation des nanocristaux de KTP en tant que sonde.

c) *Mise au point d'une méthode de détection homodyne équilibrée pour la détection de champs de second-harmonique très faibles et la mesure de la phase de la génération de seconde harmonique. Le Xuan Appl. Phys. Lett. (2006)*

Bien que les nanocristaux de KTP soient efficaces pour la GSH, l'émission de photons est proportionnelle à d^6 , où d est le diamètre du monocristal. On atteint vite la limite de détection du microscope en diminuant cette taille. Une voie possible pour dépasser cette limite, liée au bruit d'obscurité des photodiodes à avalanche, est de réaliser une détection interférométrique de la GSH émise par les nanocristaux. En particulier, la détection cohérente homodyne équilibrée est bien adaptée à la mesure du champ très faible émis par un nanocristal. Une telle détection n'avait jamais été réalisée sur un nanocristal unique au foyer d'un microscope. Nous avons pu démontrer expérimentalement le principe d'une telle microscopie, aujourd'hui déjà compétitive avec la détection par photodiode à avalanche (quelques photons par seconde). De plus une détection interférométrique est capable d'extraire la phase de la GSH et ainsi d'apporter une information sur l'orientation absolue du nanocristal.

d) Fonctionnalisation de pointes de microscope à force atomique par des billes d'or pour l'étude de l'interaction plasmonique entre une bille d'or et un nanocrystal de KTP.

Grâce à l'acquisition d'un microscope à force atomique que nous avons adapté à notre microscope à deux photons, nous avons pu commencer l'étude de nouvelles microscopies fondées sur l'utilisation de la GSH d'un nanocrystal de KTP pour sonder des champs électromagnétiques intenses pouvant exister au voisinage de surfaces ou de nanostructures excitées par des faisceaux ultrarapides. Dans ce cadre une première étape est de considérer l'interaction entre une nanobille métallique et un nanocrystal de KTP isolé. Pour cela, en collaboration avec Yannick DE WILDE (ESPCI) nous avons fonctionnalisé des pointes AFM avec des nanobilles d'or pour ensuite les approcher au voisinage de nanocristaux de KTP. En modifiant la configuration du champ exciteur, nous avons clairement observé que le nanocrystal de KTP était sensible au champ électromagnétique créé par la nanobille. Ces études sont en cours.

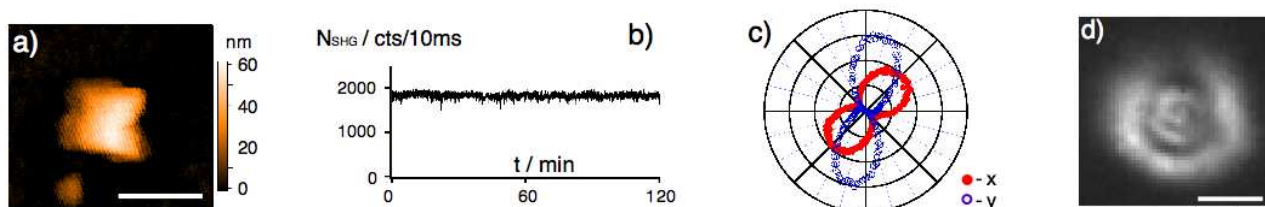


Figure 30 : Etude d'une nanoparticule de KTP de taille 60 nm : (a) Image topographique AFM, (b) stabilité de l'émission de GSH, (c) analyse en polarisation et (d) image défocalisée de l'émission GSH

1 – 2 – 5 – Conclusion

Durant ces quatre dernières années, l'activité du Laboratoire a nettement évolué vers l'étude des nanostructures d'une part, et vers l'ouverture aux sciences du vivant d'autre part. La dimension « nano » se place désormais au cœur des activités de toutes les équipes du laboratoire : démonstration d'un gain net dans un guide polymère dopé par des boîtes quantiques semiconductrices, étude de la luminescence des nanotubes, caractérisation et manipulation multiphotonique de nanostructures et de molécules individuelles, utilisation de nanocristaux de diamant à centres NV comme sources de photons uniques et comme marqueurs luminescents en biologie. D'autre part, la dimension pluridisciplinaire du LPQM, déjà largement présente en ce qui concerne l'interface physique/chimie au sein de toutes les équipes, s'ouvre désormais à la biophotonique, que ce soit dans le domaine de l'imagerie et du tracking de nano-objet en milieu cellulaire, ou dans une perspective tournée vers les capteurs utilisant des composants photoniques à base de polymères. Cette évolution est constamment stimulée et soutenue, via le financement de projets internes et la prise en charge de la maintenance de la salle blanche, par l'Institut d'Alembert dont le LPQM est l'une des composantes les plus actives. Ces tendances vont s'accroître au cours du prochain quadriennal (voir Prospective).

Les points forts de l'Unité résident précisément dans cette dimension multi-échelle (de la molécule au composant) et pluridisciplinaire (de la cryptographie quantique à la biophotonique). La culture propre du laboratoire consistant à travailler en filière, par exemple de la molécule au matériau puis au dispositif, a permis aux équipes de s'ouvrir sans difficultés à de nouvelles activités scientifiques aux « interfaces », tout en conservant et en approfondissant son propre cœur de métier dans le domaine des interactions lumière-matière.

Le LPQM dispose d'un vaste réseau de collaborations nationales, européennes et internationales, via la participation à différents GDR et à des projets et réseaux européens (1 réseau d'excellence, 3 STREP entre 2005 et fin 2008). Des partenariats binationaux, notamment avec la NTU à Taiwan et l'ECNU à Shanghai, permettent des échanges d'étudiants et la mise en place de thèses en cotutelle. Enfin, le LPQM participe très activement, par l'intermédiaire de l'Institut d'Alembert, au nouveau Laboratoire Européen Associé « Nabi » mis en place courant 2008 par J. Zyss, directeur de l'Institut d'Alembert, entre l'Institut Weizmann en Israël et 3 laboratoires CNRS (Institut d'Alembert, LKB à l'ENS Paris et Institut Fresnel à Marseille) et qui pourrait déboucher d'ici trois ans sur une Unité Mixte Internationale.

Un des problèmes rencontrés au niveau scientifique concerne la fourniture des matériaux adaptés, dans des délais raisonnables, par des partenaires ou des fournisseurs extérieurs au Laboratoire et à l'Institut d'Alembert. En particulier, le laboratoire n'a pas pu disposer en quantités suffisantes de matériaux polymères électro-optiques à hautes performances dont les propriétés optiques non linéaires seraient proches des meilleurs matériaux mis au point aux Etats-Unis dans ce domaine (A. Jen, L. Dalton). Les résultats

récemment obtenus sont certes encourageants compte tenu du matériau utilisé actuellement, mais risquent de « plafonner » une fois réalisée l'optimisation à l'échelle du composant. Pour cette raison, l'équipe Composants du LPQM va se consacrer, dans le prochain exercice, au développement de dispositifs utilisant les mêmes technologies que les composants électro-optiques, mais avec des objectifs clairement orientés vers la mise au point de capteurs chimiques et biochimiques. De même, la fourniture de nanoparticules de PbSe ou de nanodiamants nécessite parfois de longs délais d'attente. Il conviendrait donc, dans certains cas, soit de rechercher des partenaires plus adaptés s'ils existent, ou de choisir des matériaux d'accès plus facile. Cela étant, le Laboratoire tient à maintenir et à développer des collaborations amont avec les laboratoires de chimie et de sciences des matériaux capables de fournir des molécules et des matériaux au meilleur de l'état de l'art dans le domaine. Les premiers résultats obtenus dans le domaine des complexes métalliques photochromes en est une illustration.

Une difficulté dont la cause est externe à l'Unité réside dans le caractère limité des accès aux revues scientifiques, notamment les journaux de l'American Institute of Physics, de l'American Physical Society et de l'Optical Society of America. L'ENS Cachan ne propose aucune solution à cet égard, et les revues accessibles par BiblioST2I ne comprennent pas celles éditées par les sociétés savantes ci-dessus. Il s'agit d'un handicap très lourd pour l'Unité, auquel il est pallié par des solutions de fortune très coûteuses en temps (visites régulières à la bibliothèque de Paris VI, par exemple). Cette situation est également très pénalisante pour les personnels non permanents, doctorants et post-doctorants, pour lesquels une telle situation est totalement incompréhensible.

PARTIE 2 : PRODUCTION SCIENTIFIQUE

ACL

Articles dans des **revues internationales ou nationales avec comité de lecture** répertoriées dans les bases de données internationales (ISI Web of Knowledge, Google Scholar, Harzing Publish or Perish, Pub Med...)

Le facteur d'impact de la revue pourra être indiqué, en précisant la source de données utilisée.

1. G. Gaborit, G. Martin, L. Duville, J.-L. Coutaz, C. T. Nguyen, R. Hierle and J. Zyss, Electrooptic Probe Based on an Organic Microcavity, *IEEE Phot. Technol. Lett.*, 17 (10), 2140-2142, (2005).
2. B. Bêche, P. Papet, D. Debarnot, E. Gaviot, J. Zyss, F. Poncin-Epaillard, «Fluorine plasma treatment on SU-8 polymer for integrated optics», *Opt. Commun.*, vol 246/1-3 pp. 25- 28 (2005).
3. N. Pelletier, B. Bêche, N. Tahani, L. Camberlein, E. Gaviot, A. Goullet, J.P. Landesman, J. Zyss, «Integrated Mach-Zehnder interferometer on SU-8 polymer for versatile pressure sensor», *IEEE Sensors* 2005, vol. 4, pp. 640-643.
4. T. Ben-Messaoud, J. Zyss, "Unidirectional laser emission from polymer-based spiral microdisks", *Appl. Phys. Lett.*, 86, (24), 241110 (2005).
5. F. Courvoisier, V. Boutou, J. P. Wolf, R. K. Chang, and J. Zyss, "Deciphering output coupling mechanisms in spiral microcavities with femtosecond light bullets," *Opt. Lett.* 30, 738-740 (2005)
6. B. Bêche, N. Pelletier, R. Hierle, A. Goullet, J.P. Landesman, E. Gaviot, J. Zyss, «Conception of Optical Integrated Circuits on Polymers», *Microelectronics Journal*, 2006, vol. 37, pp. 421-427.
7. N. Pelletier, B. Bêche, E. Gaviot, L. Camberlein, N. Grossard, F. Polet, J. Zyss, «Single-mode rib optical waveguides on SOG/SU-8 polymer and integrated Mach-Zehnder for designing thermal sensors», *IEEE Sensors Journal*, 2006, vol. 6, n°3, pp. 565-570.
8. T. Katchalski, G. Levy-Yurista, A. Friesem, G. Martin, R. Hierle, and J. Zyss, " Light modulation with electro-optic polymer-based resonant grating waveguide structures", *Opt. Express* 13 (12), 4645-4650 (2006).
9. M. Lebental, J.S. Lauret, R. Hierle, J. Zyss, Highly directional stadium-shaped polymer microcavities, *Appl. Phys. Lett.*, 88, 031108 (2006).
10. M. Lebental, J. S. Lauret, J. Zyss, C. Schmit, E. Bogomolny, Directional emission of stadium-shaped microlasers, *Phys. Rev. A*, 75, 033806 (2007).
11. M. Lebental, N. Djellali, C. Arnaud, J.-S. Lauret, J. Zyss, R. Dubertrand, C. Schmit, E. Bogomolny, Inferring periodic orbits from spectra of simple shaped micro-lasers, *Phys. Rev. A*, 76, 023830 (2007).

12. R. Driben, B. A. Malomed, A. Gubeskys, Joseph Zyss, Cubic-quintic solitons in the checkerboard potential, *Phys. Rev. E*, 76, 066604 (2007).
13. T. Begou, B. Bêche, A. Goullet, J.P. Landesman, A. Granier, C. Cardinaud, E. Gaviot, L. Camberlein, N. Grossard, G. Jézéquel, J. Zyss, First developments for photonics integrated on plasma-polymer-HMDSO: Single-mode TE₀₀–TM₀₀ straight waveguides, *Optical Materials*, 30, 657–661 (2007).
14. N. Pelletier, B. Bêche, N. Tahani, J. Zyss, L. Camberlein and E. Gaviot, “ SU-8 waveguiding interferometric micro-sensor for gage pressure measurement », *Sensors Actuators A* 135 179–184 (2007) N. Pelletier, B. Bêche, N. Tahani, J. Zyss, L. Camberlein, E. Gaviot, «SU-8 waveguiding interferometric micro-sensor for gage pressure measurement», *Sensors and Actuators : Physical A*, vol. 135, pp. 179-184 (2007)
15. T. Begou, B. Bêche, A. Goullet, J.P. Landesman, A. Granier, C. Cardinaud, E. Gaviot, L. Camberlein, , N. Grossard, G. Jézéquel, J. Zyss, «First developments for photonics integrated on plasma-polymer-HMDSO : Single-mode TE₀₀-TM₀₀ straight waveguides», *Optical Materials*, vol. 30, pp.657-661 (2007).
16. E. Destandau, J.-P. Lefèvre, A. C. F. Eddine, S. Desportes, M. C. Jullien, R. Hierle, I. Leray, B. Valeur, J. A. Delaire, A novel microfluidic flow-injection analysis device with fluorescence detection for cation sensing. Application to potassium, *Anal Bioanal Chem*, 387, 2627-2632, (2007).
17. A. Zebda, L. Camberlein, B. Bêche, E. Gaviot, E. Bêche, D. Duval, J. Zyss, G. Jézéquel, F. Solal, C. Godet, «Spin coating and plasma process for 2.5D integrated photonics on multilayer polymers», *Thin Solid Films*, vol. 516, pp.8668-8674 (2008).
18. R. Dubertrand, E. Bogomolny, N. Djellali, M. Lebental, and C. Schmit, Circular dielectric cavity and its deformations, *Phys. Rev. A*, 77, 013804 (2008).
19. T Begou, B. Bêche, N Grossard, J Zyss, A Goullet, G Jezequel, E.Gaviot, Marcatili's extended approach: comparison to semi-vectorial methods applied to pedestal waveguide design, *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, **10** 055310 (2008).
20. B. Bêche, E. Gaviot, A. Renault, J. Zyss, F. Artzner, «Another way to shape comprehensive analytical approach describing electromagnetic energy distribution through four-slablayer structures», *Opt.*, 2008, accepté, sous presse
21. Tao Yi, Rene Clément, Christian Haut, Laure Catala, Thierry Gacoin, Nicolas Tancrez, Isabelle Ledoux, Joseph Zyss « J-Aggregated Dye – MnPS₃ Hybrid Nano-Particles With Giant Quadratic Optical Non-Linearity » *Adv. Materials*, 17(3), 335 (2005).
22. C. Feuvrie, I. Ledoux, J. Zyss, H. Le Bozec, O. Maury, “Supramolecular associations of anionic and cationic octupoles”. *Compte Rendus de Chimie* 8 1243-1248 (2005).
23. Isabelle Ledoux-Rak, Joseph Zyss, T. Le Boudier, O. Maury, A. Bondon, H. Le Bozec, “Self-ordered dendrimers based on multi-octupolar ruthenium complexes for quadratic nonlinear optics”, *J. Luminescence*, 111, n°, 215-387 (2005).
24. Christian G. Claessens, David Gonzalez-Rodriguez, Tomas Torres, Guillermo Martin, Fernando Agullo-Lopez, Isabelle Ledoux, Joseph Zyss, Victor R. Ferro, and Jose M. Garcia de la Vega, « Structural Modulation of the Dipolar-Octupolar Contributions to the NLO Response in Subphthalocyanines » *J. Phys. Chem. B*, 109, 3800-3806 (2005).
25. Nicolas Tancrez, Christophe Feuvrie, Isabelle Ledoux, Joseph Zyss, Loïc Toupet, Hubert Le Bozec, and Olivier Maury “Lanthanide Complexes for Second Order Nonlinear Optics: Evidence for the Direct Contribution of f Electrons to the Quadratic Hyperpolarizability”, *J. Am. Chem. Soc.* 127(39), 13474-13475 (2005).
26. C. Arbez-Gindre, B.R. Steele, G.A. Heropoulos, C.G. Screttas, J.-E. Communal, W.J. Blau and I.Ledoux-Rak, "A facile organolithium route to ferrocene-based triarylmethyl dyes with substantial near IR and NLO properties », *J. Organomet. Chem.*, 690, 1620-1626 (2005).

27. A.Q. Le Quang, J. Zyss, I. Ledoux, V.G. Truong A-M. Jurduc, B. Jacquier, D.H. Le, A. Gibaud, "An hybrid organic-inorganic approach to erbium-functionalized nanodots for emission in the telecom window", *Chemical Physics* 318, 33 (2005).
28. Andrés de la Escosura, Christian G. Claessens, Isabelle Ledoux-Rak, Joseph Zyss, M. Victoria Martínez-Díaz and Tomás Torres, « [2,2]paracyclophane-bisphthalocyanines: non-classical push-pull systems for second harmonic generation », *Journal of Porphyrins and Phthalocyanines (JPP)*, 9, n° 11, 788 (2005).
29. Maurizio Quintiliani, Eva M. García-Frutos, Andreas Gouloumis, Purificación Vázquez, Isabelle Ledoux-Rak, Joseph Zyss, Christian G. Claessens, [Tomás Torres](#), »Synthesis, Characterisation and Nonlinear Optical Properties of Two-Dimensional Octupolar Systems Based on Phthalocyanine Compounds », *Eur. J. Org. Chem.*, 18, 3911-3915 (2005).
30. N. Nguyen Thi Kim, M. Dumont, J. A. Delaire And K. Nakatani, " Orientation of Azo-Dye molecules in polymer films, via photoisomerization: Dichroism measurements and second harmonic generation " *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*430, 249-256 (2005).
31. Lorena Millán, Mauricio Fuentealba, Carolina Manzur, David Carrillo, Nadège Faux, Bertrand Caro, Françoise Robin-Le Guen, Sourisak Sinbandhit, Isabelle Ledoux-Rak and Jean-René Hamon, « Dipolar Organo-Iron Methylenepyran-Hydrazone Complexes: Synthesis, Characterization, Crystal Structure, Linear and nonlinear optical properties », *Eur. J. Inorg. Chem.*, 1131–1138 (2006)
32. Katell Sénéchal-David, Anne Hemeryck, Nicolas Tancrez, Loïc Toupet, J. A. Gareth Williams, Isabelle Ledoux, Joseph Zyss, Abdou Boucekkine, Jean-Paul Guégan, Hubert Le Bozec, and Olivier Maury, "Synthesis, structural studies, theoretical calculations, and linear and nonlinear optical properties of terpyridyl lanthanide complexes: New evidence for the contribution of f electrons to the NLO activity" *J. Am. Chem. Soc.* 128, 12243-12255 (2006).
33. A.Q Le Quang, R. Hierle, J. Zyss, I. Ledoux, G. Cusmai, R. Costa, A. Barberis, S. Pietralunga. "Demonstration of net gain at 1550 nm in an erbium-doped polymer single mode rib waveguide". *Applied Physics Letters*. 89, 141124 (2006).
34. E. Lifshitz, M. Brumer, A. Kigel, M. Sirota, E. Galun, Z. Burshtein, A. Q. Le Quang, I. Ledoux-Rak, J. Zyss. "Air-stable PbSe/PbS and PbSe/PbSe_xS_{1-x} core-shell nanocrystals quantum dots and their applications". *J. Physical Chemistry:B*. 110(50), 25356 (2006).
35. I. Janowska, F. Miomandre, G. Clavier, P. Audebert, J. Zakrzewski, K.H. Thi and I. Ledoux-Rak, « Donor-Acceptor-Donor Tetrazines Containing a Ferrocene Unit : Synthesis, Electrochemical and Spectroscopic Properties », *J. Phys. Chem. A*, , 110, (47), 12971-12975 (2006).
36. Le Quang Anh Quoc, V G. Truong, A-M. Jurduc, B. Jacquier, J. Zyss, I. Ledoux, « Gain properties of a Er³⁺ complex in a poly(methylmethacrylate) matrix for 1540 nm broadband optical amplification ». *Journal of Applied Physics* 101, 023110 (2007).
37. Mauricio Fuentealba, Loïc Toupet, Carolina Manzur, David Carrillo, Isabelle Ledoux-Rak, Jean-René Hamon, « Pentamethylcyclopentadienyl organoiron(II) hydrazone complexes: Synthesis, spectroscopic characterization, and second-order nonlinear optical properties. X-ray crystal structure of [η⁵-C₅Me₅)Fe(η⁶-C₆H₅)NHNH₂]⁺PF₆⁻, *Journal of Organometallic Chemistry* 692, 1099–1109 (2007).
38. Anh Quoc Le Quang, Eric Besson, Rolland Hierle, Ahmad Mehdi, Catherine Reyé, Robert Corriu, Isabelle Ledoux-Rak, "Polymer-based materials for amplification in the telecommunication window : influence of erbium complex concentration on relevant parameters for the elaboration of waveguide amplifiers around 1550 nm", *Optical Materials* 29, 941–948 (2007)
39. [C. Feuvrie](#), [O. Maury](#), [H. Le Bozec](#), [I. Ledoux](#), [J. Morral](#), [G. Dalton](#), [M. Samoc](#), [M. Humphrey](#), "Nonlinear Optical and Two-Photon Absorption Properties of Octupolar Tris(bipyridyl)metal Complexes ", *J. Phys. Chem. A*, 111 (37), 8980 -8985, (2007).

40. S.L. Bondarev, S.A. Tikhomirov, V.N. Knyukshto, A.A. Turban, A.A. Ischenko, A.V. Kulinich and I. Leodux, "Fluorescence and solvatochromism of a merocyanine dye with a high quadratic polarizability in solutions and polymer films", *J. Lumin.* 124, n°1, pp. 178-186 (2007).
41. Vincent Aubert, Véronique Guerschais, Eléna Ishow, Khuyen Hoang-Thi, Isabelle Ledoux, Keitaro Nakatani, and Hubert Le Bozec, « Efficient Photoswitching of the Nonlinear Optical Properties of Dipolar Photochromic Zinc(II) Complexes », *Angew. Chem. Int. Ed.* 47, 577-580 (2008)
42. V. Singh, R. P. S. Chakradhar, I. Ledoux, L. Badie, F. Pellé, S. Ivanova, "Infrared and visible emissions of Er^{3+} in combustion synthesized CaAl_2O_4 phosphors", *J. Luminescence*, 2008 (Accepté).
43. J.S. Lauret, C. Voisin, S. Berger, G. Cassabois, C. Delalande and Ph. Roussignol, "Environmental effects on the carrier dynamics in carbon nanotubes", *Phys. Rev. B* 72, 113413 (2005).
44. J.S. Lauret, R. Arenal, F. Ducastelle, A. Loiseau, M. Cau, B. Attal-Tretout, E. Rosencher and L. Goux-Capes, "Optical transitions in Single Wall Boron Nitride Nanotubes", *Phys. Rev. Lett.* 94, 037405 (2005).
45. J. Wenus, R. Parashkov, S. Ceccarelli, A. Brehier, J.-S. Lauret, M. S. Skolnick, E. Deleporte and D. Lidzey, "Hybrid organic-inorganic exciton-polaritons in a strongly coupled microcavity", *Phys. Rev. B* 74, 235212 (2006).
46. A. Brehier, R. Parashkov, J.-S. Lauret and E. Deleporte, "Strong exciton-photon coupling in a microcavity containing layered pérovskites semiconductors", *Appl. Phys. Lett.* 89, 171110 (2006).
47. P. Jaffrenou, J. Barjon, J.S. Lauret, B. Attal-Tretout, F. Ducastelle, A. Loiseau "Origin of the excitonic recombinations in hexagonal boron nitride by spatially resolved cathodoluminescence spectroscopy", *J. Appl. Phys.* 102, 116102 (2007)
48. P. Jaffrenou, J. Barjon, J. S. Lauret, A. Maguer, D. Golberg, B. Attal-Trétout, F. Ducastelle and A. Loiseau, *Phys. Stat. Sol. (b)* 244, 4147 (2007).
49. P. Jaffrenou, F. Donatini, J. Barjon, J.S. Lauret, A. Maguer, B. Attal-Tretout, F. Ducastelle, A. Loiseau, "Cathodoluminescence imaging and spectroscopy on a single multiwall boron nitride nanotube", *Chem. Phys. Lett.* 442, 372 (2007).
50. M.G. Silly, P. Jaffrenou, J. Barjon, J.-S. Lauret, F. Ducastelle, A. Loiseau, E. Obraztsova, B. Attal-Tretout and E. Rosencher, "Luminescence properties of hexagonal boron nitride : Cathodoluminescence and photoluminescence spectroscopy measurements", *Phys. Rev. B* 75, 085205 (2007).
51. C. Symonds, J. Bellessa, and J. C. Plenet, A. Brehier, R. Parashkov, J.-S. Lauret and E. Deleporte, "Emission of hybrid organic-inorganic exciton/plasmon mixed states", *Appl. Phys. Lett.* 90, 091107 (2007).
52. G. Magadur, J-S. Lauret, V. Alain-Rizzo, C. Voisin, P. Roussignol, E. Deleporte and J. A. Delaire, "Excitation Transfer in Functionalized Carbon Nanotubes", *ChemPhysChem* 9, 1250-1253 (2008)
53. P. Jaffrenou, J. Barjon, T. Schmid, L. Museur, A. Kanaev, J.-S. Lauret, C. Y. Zhi, C. Tang, Y. Bando, D. Golberg, B. Attal-Tretout, F. Ducastelle, and A. Loiseau, "Near-band-edge recombinations in multiwalled boron nitride nanotubes: Cathodoluminescence and photoluminescence spectroscopy measurements", *Phys. Rev. B* 77, 235422 (2008)
54. G. Lanty, J. S. Lauret, E. Deleporte, S. Bouchoule, and X. Lafosse, "UV polaritonic emission from a perovskite-based microcavity", *Appl. Phys. Lett.* 93, 081101 (2008)
55. G Lanty, A. Bréhier, R. Parashkov, J. S. Lauret and E. Deleporte, "Strong exciton–photon coupling at room temperature in microcavities containing two-dimensional layered perovskite compounds", *New Journal of Physics* 10, 065007 (2008)
56. C Symonds, C. Bonnand, J-C. Plenet, A. Bréhier, R. Parashkov, J-S. Lauret, E. Deleporte and J. Bellessa "Particularities of surface plasmon–exciton strong coupling with large Rabi splitting", *New Journal of Physics* 10, 065017 (2008)
57. K. Komorowska, S. Brasselet, J. Zyss, L. Pourlsen, M. Jazdyk, H.J. Egelhaaf, J. Gierschner, M. Hanack, " Nanometric scale investigation of the nonlinear efficiency of perhydrotriphenylene inclusion compounds", *Chem. Phys.* 318 (1-2), 12-20 (2005)

58. C. Anceau, S. Brasselet, J. Zyss, « Local orientational distribution of molecular monolayers probed by nonlinear microscopy », *Chem. Phys. Lett.* 411(1-3), 98-102 (2005)
59. R. Piron, S. Brasselet, D. Josse, J. Zyss, G. Viscardi, « Matching molecular and optical multipoles in photoisomerizable octupolar nonlinear systems », *J. Opt. Soc. Am. B* 22 (6) 1276-1282 (2005)
60. S. Bidault, J. Gouya, S. Brasselet, J. Zyss, « Encoding multipolar polarization patterns by optical poling in polymers: towards nonlinear optical memories », *Opt. Expr.* 13 (2) 506-510 (2005)
61. V. Le Floch, S. Brasselet, J. Zyss, B.R. Cho, S.H. Lee, S.J. Jeon, M. Cho, K.S. Min, M.P. Suh, « High efficiency and quadratic nonlinear optical properties of a fully optimized 2-D octupolar crystal by nonlinear microscopy », *Adv. Mater.* 17 (2) 196-200 (2005)
62. M. Stockman, K. Li, S. Brasselet, J. Zyss, « Octupolar metal nanoparticles as optically driven coherently controlled nanomotors » *Chem. Phys. Lett.* 433, 130-135 (2006)
63. L. Le Xuan, F. Marquier, D. Chauvat, S. Brasselet, F. Treussart, S. Perruchas, C. Tard, T. Gacoin, JF Roch, « Balanced homodyne detection in second harmonic generation microscopy » *Appl. Phys. Lett.*, 89, 121118 (2006)
64. E. Delahaye, N. Tancrez, T. Yi, I. Ledoux, J. Zyss, S. Brasselet, R. Clément, «Second harmonic generation from individual hybrid MnPS3-based nanoparticles investigated by nonlinear microscopy» *Chem. Phys. Lett.* 429, 533-537 (2006).
65. T. Toury, S. Brasselet, J. Zyss, « Electro-optical microscopy: mapping nonlinear polymer films with micrometric resolution », *Opt. Lett.* 31 (10), 1468-1471 (2006)
66. S. Bidault, L. Viau, O. Maury, S. Brasselet, J. Zyss, E. Ishow, K. Nakatani, H Le Bozec, «Optically Tunable Nonlinearities in Polymers Based on Photoisomerizable Metal-Based Coordination Complexes» *Adv Func Mater* 16 (17), 2252-2262 (2006)
67. Jacob Szeftel, Patrick Leroux-Hugon, and Guoxiang Huang, "Solitary acoustoelectric microwave domain in piezoelectric semiconductors", *Europhysics Lett.* 73, 752(2006).
68. Guo-Xiang Huang, Jacob Szeftel, "Coupled Optical Solitons for Pulse Propagation in Multi-Level Media", *Chinese Physics Letters* 23 (4): 834-83 (2006)
69. N. Sandeau, L. Le Xuan, D. Chauvat, C. Zhou, J.-F. Roch, and S. Brasselet, « Defocused imaging of second harmonic generation from a single nanocrystal » *Opt. Expr.* 15 (24), 16051-60 (2007)
70. M-Y Jeong, H.M. Kim, S.-J. Jeon, S. Brasselet, B.R. Cho, "Octupolar Films with Significant Second-Harmonic Generation", *Adv. Mater.* 19, 2107-2111 (2007)
71. S. Brasselet, J. Zyss, « Nonlinear polarimetry of molecular crystals down to the nanoscale », *C. R. Physique* 8, 165-179 (2007).
72. S. Bidault, S. Brasselet, J. Zyss, O. Maury, H Le Bozec, « Role of spatial distortions on the quadratic nonlinear optical properties of octupolar organic and organometallic molecules » *J. Chem. Phys.* 126, 034312-1-13 (2007)
73. D. Chauvat, C. Bonnet, K. Dunseath, O. Emile, and A. Le Floch, Timing the total reflection of light, *Phys. Lett. A* 336, 271-273 (2005).
74. G. Ropars, D. Chauvat, A. Le Floch, M. N. O'Sullivan-Hale, and R.W. Boyd, "Dynamics of gravity induced gradients in soap films", *Appl. Phys. Lett.* 88, 234104 (2005).
75. T. Ruchon, M. Vallet, D. Chauvat, A Le Floch, and J.-Y. Thépot, "Experimental investigation of the magnetochiral index in liquids", *Phys. Rev. A* 72, 043405 (2005).
76. G. Loas G, C. Bonnet, D. Chauvat, O. Emile and A. Le Floch 'h, Amplified details of Newton-Wigner delays in total reflection, *Journal de Physique IV* 135, 223-225 (2006).
77. C. Bonnet, G. Loas, D. Chauvat,, O. Emile and A. Le Floch 'h, "Exploration of the reflection time in interfaces", *Journal de Physique IV* 135, 17-24 (2006).

78. T. Ruchon, M. Vallet, D. Chauvat, A. Le Floch and M. Vallet, "A dipole interaction model for magnetochiral birefringence", *Journal of Chemical Physics* 125, 084104 (2006).
79. G. Loas, C. Bonnet, K. Dunseath, D. Chauvat, O. Emile and A. Le Floch. "Magic angle detection of nonlinear Newton-Wigner times at interfaces", *Eur. Phys. Lett.* 77, 64003 (2007).
80. N. Passilly, R. de Saint Denis, K. Aït-Ameur, F. Treussart, R. Hierle, and J.-F. Roch, "Simple interferometric technique for generation of a radially polarized light beam," *J. Opt. Soc. Am. A* 22, 984-991 (2005).
81. V. Jacques, E. Wu, T. Toury, F. Treussart, A. Aspect, P. Grangier, J.-F. Roch, "Single-photon wavefront-splitting interference. An illustration of the light quantum in action", *Eur. Phys. J. D* 35, 561 (2005).
82. Frédéric Grosshans, "Collective attacks and unconditional security in continuous variable quantum key distribution", *Phys. Rev. Lett.* **92** 020504 (2005)
83. H. Zeng, G. Wu, E. Wu, H. Pan, C. Zhou, F. Treussart, J.-F. Roch, "Generation and Detection of Infrared Single Photons and their Applications", *Front. Phys. China* 1, 1-18 (2006).
84. M. Navascués, F. Grosshans, A. Acín, "Optimality of Gaussian Attacks in Continuous Variable Quantum Cryptography", *Physical Review Letters* 97, 190502 (2006).
85. Quynh Dinh Xuân, R. Alléaume, Liantuan Xiao, F. Treussart, B. Journet and J.-F. Roch, "Intensity noise measurement of strongly attenuated laser diode pulses in the time domain", *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 35, 117-121 (2006).
86. E. Wu, V. Jacques, H. Zeng, Ph. Grangier, F. Treussart, J.-F. Roch, "Narrow-band single-photon emission in the near infrared for quantum key distribution" *Optics Express* 14, 1296-1303 (2006).
87. E. Wu, V. Jacques, F. Treussart, H. Zeng, P. Grangier, J.-F. Roch, "Single-photon emission in the near infrared from diamond colour centre", *Journal of Luminescence* 119-120, 19-23 (2006)
88. F. Treussart, V. Jacques, E. Wu, T. Gacoin, P. Grangier, J.-F. Roch, "Photoluminescence of single colour defects in 50 nm diamond nanocrystals", *Physica B* 376, 926-929 (2006)
89. L. Le Xuan, C. Zhou, A. Slablab, D. Chauvat and J.-F. Roch, "Investigation of KTiOPO₄ nanocrystals by means of second-harmonic light emission" *Annales de Physique* 32, 99-101 (2007).
90. V. Jacques, S. Régnier, D. Chauvat, J.-F. Roch, "Color Centers in Diamond as Practical Single-Photon Source to Illustrate Quantum Complementarity," in *Diamond Electronics - Fundamentals to Applications*, edited by P. Bergonzo, R. Gat, R.B. Jackman, C.E. Nebel, *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* 956, Warrendale, PA, 0956-J02-01 (2007).
91. D. Murray, V. Jacques, F. Marquier, D. Chauvat, F. Grosshans, F. Treussart and J.-F. Roch, "Improvement of photostability using feedback from single-molecule fluorescence time trace", *Annales de Physique* 32, 135-138 (2007).
92. V. Jacques, « Sources de photons uniques et expérience à choix retardé de Wheeler : la dualité onde corpuscule à l'épreuve de l'expérience », *Ann. Phys. (France)* 32, 1-136 (2007).
93. E. Wu, J. R. Rabeau, G. Roger, F. Treussart, H. Zeng, P. Grangier, S. Praver, J.-F. Roch, "Room temperature triggered single-photon source in the near infrared", *New Journal of Physics* 9, 434 (2007).
94. V. Jacques, E. Wu, F. Grosshans, F. Treussart, Ph. Grangier, A. Aspect, J.-F. Roch, "Experimental Realization of Wheeler's Delayed-Choice Gedanken Experiment", *Science* 315, 966-968 (2007).
95. T. Coudreau, F. Grosshans, S. Guibal L. Guidoni, "Feasibility of a quantum memory for continuous variables based on trapped ions: from generic criteria to practical implementation", *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 40, 413 (2007).
96. E. Ishow, A. Brosseau, G. Clavier, K. [Nakatani](#), R. [Pansu](#), J.J. [Vachon](#), P. [Tauc](#), D. [Chauvat](#), C.R. [Mendonça](#), E. [Piovesan](#), "Two-photon fluorescent holographic rewritable micropatterning Record contains structures", *Journal of the American Chemical Society* 129, 8970 (2007).

97. L. Le Xuan, C. Zhou, A. Slablab, D. Chauvat, C. Tard, S. Perruchas, T. Gacoin, P. Villeval, J.-F. Roch, "Photostable Second-Harmonic Generation from a Single KTiOPO₄ Nanocrystal for Nonlinear Microscopy", *Small*, **4** 1332-1336 (2008).
98. Y. Sonnefraud, A. Cuche, O. Faklaris, J.-P. Boudou, T. Sauvage, J.-F. Roch, F. Treussart, S. Huant, "[Diamond nanocrystals hosting single nitrogen-vacancy color centers sorted by photon-correlation near-field microscopy](#)", *Optics Letters*, Vol. 33 Issue 6, pp.611-613 (2008).
99. C. Zhou, Loc Le Xuan, A. Slablab, N. Sandeau, S. Brasselet, D. Chauvat, J.-F. Roch, « Investigation of KTiOPO₄ nanocrystals [by means of second-harmonic light emission](#) », *Chinese Optics Letters*, Vol. 6, Issue 1, pp.64-67 (2008).
100. C. Zhou, L. Le Xuan, A. Slablab, N. Sandeau, S. Brasselet, D. Chauvat, J.-F. Roch, "Investigation of KTiOPO₄ nanocrystals by means of second-harmonic light emission", *Chinese Optics Letters*, 6(1), 64-67 (2008).
101. V. Jacques, E. Wu, F. Grosshans, F. Treussart, P. Grangier, A. Aspect, and J.-F. Roch, "Delayed-choice test of quantum complementarity with single photons", *Phys. Rev. Lett.* 100, 220402 (2008).
102. V. Jacques, N. D. Lai, A. Dréau, D. Zheng, D. Chauvat, F. Treussart, P. Grangier, J.-F. Roch, "Illustration of quantum complementarity using single photons interfering on a grating", *New Journal of Physics*, accepté pour publication (2008).
103. O. Faklaris, D. Garrot, V. Joshi, F. Druon, J.-P. Boudou, T. Sauvage, P. Georges, P. Curmi, and F. Treussart, "Detection of single photoluminescent diamond nanoparticles in cell and study of the internalization pathway", *Small*, sous presse (2008).

ACLN

Articles dans des revues avec comité de lecture non répertoriées dans des bases de données internationales.

ASCL

Articles dans des revues sans comité de lecture,

INV

Conférences données à l'invitation du Comité d'organisation dans un congrès national ou international.

1. Ledoux, Anh Quoc Le Quang, Nicolas Tancrez, Sophie Brasselet and Joseph Zyss, « Novel Hybrid Multifunctional Nanostructured Materials for Photonics », Isabelle Photonics West 2005, San Jose, USA, 20-25 janvier 2005
2. Isabelle Ledoux, Anh Quoc Le Quang, Nicolas Tancrez, Sophie Brasselet and Joseph Zyss, "Multifunctional Materials and Nanostructures for NLO and laser applications », ICOPE 2005 / ICONO'8 Conference, Matsushima, Miyagi, Japon, 7-11 mars 2005
3. Isabelle LEDOUX-RAK, Anh Quoc LE QUANG, Nicolas TANCREZ, Joseph ZYSS, « Hybrid multifunctional molecular materials and nanostructures for photonics: Nonlinear and laser properties », VIIIth International Conference on Molecular Spectroscopy, Wroclaw-Laddek Zdroj, Pologne, 13-18 Septembre 2005
4. Isabelle Ledoux-Rak, Mélanie Lebental, Jean-Sébastien Lauret, Anh Quoc Le Quang, Rolland Hierle and Joseph Zyss, "Polymer Based Microcavity Photonics", Photonics Europe, Strasbourg, April 2-7, 2006
5. Isabelle Ledoux-Rak, « Multifunctional molecular materials and nanostructures for photonics : from molecular engineering to optoelectronic devices », First France-Japan Advanced School On Chemistry and Physics of Molecular Materials, 19-23 Mars 2006, Rennes.
6. Isabelle LEDOUX-RAK, Composants à base de polymères pour le traitement optique du signal en télécommunications : nouveaux procédés, nouvelles fonctions, Ecole thématique Nanophotonique sur Silicium, Dourdan, 3-7 juillet 2006.
7. Isabelle Ledoux-Rak et Joseph Zyss, « Molecular Photonics », PHOREMOST Florence Workshop, Montegufoni, June 18-22, 2006.

8. Isabelle LEDOUX-RAK, Anh Quoc LE QUANG, Joseph ZYSS, « Multifunctional molecular materials and nanostructures for photonics : from molecular engineering to optoelectronic devices » Symposium on Photonics Technologies – OPERA 2015, Wrocław, October 12-14, 2006.
9. Isabelle LEDOUX-RAK, Anh Quoc LE QUANG, Joseph ZYSS, “Molecular nanostructured materials for optical communications : from molecular engineering to optoelectronic devices”, 6th Israeli-French Workshop “Advances in Optical and Laser Materials: Crystals, Amorphous Materials, Photonic Crystals and Nano-Particles” Jerusalem, Maale Hachmisha Hotel, 10 – 12 December 2006
10. Isabelle LEDOUX-RAK, Anh Quoc LE QUANG, Joseph ZYSS, « New polymer-based materials and devices for amplification in the telecommunication windows », Third International Workshop on Photonic and Electronic Materials. July 4-6, 2007. Donostia-San Sebastian (Espagne).
11. A. Q. Le Quang, I. Ledoux-Rak and J. Zyss, « Amplification properties of PbSe quantum dots doped polymer films in the telecommunication spectral window », IXth International Conference on Frontiers of Polymers and Advanced Materials, Cracovie (Pologne), 8-12 juillet 2007.
12. I. Ledoux, “Multifunctional molecular materials and nanostructures for photonics: from molecular engineering to optoelectronic devices », ICEPOM 9, Lviv (Ukraine), 26-30 mai 2008
13. G. Lanty, J.S. Lauret, L. Doyennette, S. Zhang, K. Meunier, X. Lafosse, S. Bouchoule, J. Bloch et E. Deleporte « Films minces de perovskites: Puits quantiques "naturels" hybrides organique-inorganique pour le couplage fort à température ambiante » ; JMC11, 26/08/08-29/08/08 Strasbourg, France.
14. J.S. Lauret, “Excitonic effects in nanotubes: experiments”; Workshop “Optique des nanotubes” organisé par le GDR-I “nanotubes”
15. J.S. Lauret, C. Voisin, G. Cassabois, C. Delalande, Ph. Roussignol, O. Jost, and L. Capes “Conference on lasers and electro optics”, Mai 2004, San Francisco, USA
16. J.S. Lauret, C. Voisin, G. Cassabois, C. Delalande, Ph. Roussignol, O. Jost, and L. Capes, “Ultrafast phenomena in semiconductors and nanostructure, part of Integrated optoelectronic devices”, Janvier 2004, San Jose, USA.
17. S. Brasselet, “Nonlinear microscopy techniques applied to molecular and biomolecular media” : ICONBS International conference on bionano-science (Taipei, Taiwan), (2007)
18. S. Brasselet, “Revealing molecular order by nonlinear microscopy” : 1st Japanese – France Frontier of science Symposium JFFOS (Shonan Village, Japon), (2007)
19. S. Brasselet, « Second Harmonic generation of individual nanocrystals » Photonic Nano-Objects (Les Houches, France) (2007)
20. S. Brasselet, « Microscopie non-linéaire dans les nanocristaux moléculaires et inorganiques » COLOQ (St Martin d’Hères, France) (2007)
21. S. Brasselet, « Nonlinear imaging of individual nanocrystals » E’MRS (Metz, France) (2007)
22. S. Brasselet, “Revealing molecular orders by nonlinear microscopy” Optical Spectroscopy of Biomolecular Dynamics (OSBD II) (Eilat, Israel), (2006)
23. S. Brasselet, “Controlling molecular rotational motions: from molecular assemblies down to single molecules” 3rd International Conference on Photo-Responsive Organics and Polymers (Val Thorens, France), (2007)
24. G. Dutier, J. Zyss and S. Brasselet *Demonstration of photoinduced rotation of single molecules*, 8th French Israeli conference on Quantum and Nonlinear Optics (FRISNO’8), Ein Bokek, Israel (21/02-25/02 2005)
25. J. Zyss (two lectures), *Nonlinear Optical Properties*, Spring School of the European Community Research and Training Network “Molecules “Nanochannels, synthesis, spectroscopy and applications”, chairman G. Calzaferri, Brigels, Switzerland (13/3-15/3 2005)

26. J. Zyss, *Progress in polymeric materials and devices*, 12th International Conference on Integrated Optics (ECIO'05), Grenoble, France (06/04-08/04 2005)
27. J. Zyss, A. Vella, M. Lebental, *Advances in polymer based microcavity lasers*, SPIE Microtechnologies for the new millennium Conference series 5840 (Photonic Materials, Devices and Applications), Sevilla, Spain (09/05-11/05 2005)
28. J. Zyss, *Molecular Photonics from Micron to Nano-scale: Materials, Physics and Technology*, French Taiwan workshop, National Taiwan University Taipei, (May 2005)
29. S. Brasselet, J. Zyss, *Optical Manipulation of Functional Photonic Molecules from the Micro- to the Nano-Scale*, France Korea binational Workshop on Photonic Materials, ENS Cachan, France (05/05 2006)
30. J. Zyss, *Unveiling and exploiting tensorial dimensions in molecular nonlinear optics : from multipolar systems to all-optical orientation*, Theory for the experimentalists : a Symposium celebrating Robert J. Silbey's 65th birthday, MIT, Boston (24/06-25/06 2005)
31. J. Zyss, *Nonlinear nanoscale playgrounds in molecular photonics*, distinguished lecture series (Nortel Institute of Telecommunications, IEEE and OSA), University of Toronto, Canada (12/09 2005)
32. J. Zyss, *A revival of Molecular Nonlinear Optics at the Frontiers of Nanosciences and Coherent Control*, Colloquium in honour of Daniel Chemla's 65th birthday, University of California at Berkeley, Ca, USA (21/11 2005)
33. J. Zyss, *Advances in nanoscale photonics : applications to imaging of molecular and bio-structures*, Keynote lecture, First France-Israel binational workshop on NanoBioPhotonics, chairpersons R. Marks and S. Brasselet, Eilat, Israel (10/12 – 12/12 2005)
34. J. Zyss, *Advances in nonlinear molecular photonics at the nanoscale*, Keynote address, Photonics West (Organic Photonic Materials and Devices VIII, # 6117-04), San Jose (23/01-26/01 2006)
35. M. Lebental, J. S. Lauret, R. Hierle, J. Zyss, *Fancy shaped polymer based micro-billiard lasers: tailoring tesbeds for quantum chaos*, Photonics West (Nanophotonics, # 6127-37), San Jose (23/01-26/01 2006)
36. J. Zyss, *Advances in nonlinear light-matter interactions: from molecular materials to single molecules*, Optically functional solids and polymers Colloquium, Northwestern University, Evanston, Ill, USA (30/01 2006)
37. J. Zyss, G. Dutier, S. Brasselet, *Advances in mapping and steering of functional organic molecules by nonlinear optics from micron to single molecule scale*, ISOPL'4, Dingle, Kerry Co, Ireland (28/06-30/06 2006)
38. J. Zyss, *New directions in nonlinear microscopy for nano-materials and bio-imaging*, OSA local Student Chapter Workshop on Nanophotonics, Politecnico Ancona (06/07 2006)
39. J. Zyss, *Advances in mapping and steering of functional organic molecules by nonlinear optics from micron to single molecule scale*, Romopto 2006, Sibiu, Romania (28/08-31/08 2006)
40. M. Lebental, J. S. Lauret, J. Zyss, C. Schmitt, E. Bogomolny, *Quantum chaos and plastic lasers*, Conference on Quantum Mechanics and Chaos, Osaka, Japan (September 2006)
41. J. Zyss, *Renewed perspectives in Molecular Photonics and Biophotonics at the micro- and nano-scales*, Opera 2015, Wroclaw, Poland (12/10-14/10 2006)
42. J. Szeftel, "Microwave acoustoelectric soliton in piezoelectric semiconductors " *International Conference on the Frontiers of Nonlinear and Complex Systems*; Hong-Kong Baptist University, Hong-Kong, 24-26 mai 2006.
43. J. Zyss, G. Dutier, S. Brasselet, *A revival of Molecular Nonlinear Optics at the nanoscale: from the manipulation of nanoscale assemblies to advanced multiphoton microscopies*, France-Israel Workshop on Optical and Laser Materials, Jerusalem Maale Hahamisha (11/12 -12/12 2006)

44. J. Zyss, *Multiscale symmetry considerations towards nanobioimaging*, Symposium on Inter- and Intra-Molecular Electronic Excitation Transfer and Related Phenomena (dedicated to Shammaï Speiser for his 65th birthday), Technion Institute of Technology, Haïfa, Israel (21/12 2006)
45. M. Lebental, J. S. Lauret, J. Zyss, C. Scmit and E. Bogomolny, *Quantum chaos and organic microlasers* French Israeli Symposia in Quantum and Nonlinear Optics (FRISNO'9), Les Houches, 11-16th February 2007
46. J. Zyss, *Nonlinear Photonics in Molecular Media: from the micron to the nano-scale, from information technologies to life sciences*, First Moroccan Days on Nanoscience & Nanotechnology (MDNN1), Al Akhawayn University, Ifrane Maroc, April 8 - 10, 2007
47. J. Zyss, M. Lebental, N. Djellali, J. S. Lauret, R. Dubertrand and E. Bogomolny, *Polymer micro-lasers as model systems for wave chaos physics* 8th Mediterranean workshop on « Novel Optical Materials and Applications » (NOMA'8) (2007)
48. J. Zyss, *Revivals of molecular nonlinear optics from the micro to the nanoscale* IXth International conference on frontiers of polymers and advanced materials (ICFPAM) (keynote) Cracow (Poland), July 8th-12th 2007
49. S. Brasselet and J. Zyss, *Revealing and mapping local molecular order in molecular and biological media via multiphoton confocale microscopies* Nanobiotechnology Orchid Workshop on France Taiïwan international research collaboration, Sèvres, France, July 17th 2007.
50. J. Zyss, *Advances in molecular nonlinear photonics from the micro- to the nano-scale* Xth International Conference on Advanced Materials (IUMRS-ICAM 2007), Bangalore (India), October 8th-to 13th 2007.
51. J. Zyss and D. Chauvat, *Phase and polarization sensitive schemes in nonlinear confocal imaging: applications to molecular and bio systems, Novel approaches to bio-imaging*, Howards Hughes Medical Institute, Janelia Farm, March 9th to 11th 2008
52. J. Zyss, *Nonlinear light matter interactions in molecular media*, Summer school on Nanophotonics and molecular photonics, Santander (Spain), Menéndez Pelayo International University (UIMP) June 16th to 20th 2008.
53. J. Zyss, *Symmetry and Duality in Light-matter interactions Molecular Nanobiophotonics* (Monabiphot) Erasmus Mundus summer school at Porquerolles (France), June 19th to 27th 2008
54. Mélanie Lebental, Nadia Djellali and J. Zyss, *Molecular micro-cavity lasers as model systems for chaotic wave optics, Electrical and related Properties of Organic Solids (ERPOS)*, Piechowicze (Poland), July 13th to 17th 2008
55. J. Zyss, *Revivals of Molecular Nonlinear Optics in physics, chemistry and onto life sciences* (Plenary), Nanoscience & Engineering symposium, SPIE Optics and Photonics annual meeting, San Diego, August 10th to 15th 2008
56. J. Zyss, *Revivals of Molecular Nonlinear Optics in physics, chemistry and life sciences* (Plenary), 9th European Conference on Applications of Polar Dielectrics ECAPD'09, Roma, August 26th to 29th 2008
57. J. Zyss, *Molecular manipulation by nonlinear interferences (Weigert-Glauber schemes) at micro and nano-scales: theory and experiments*, COST Training School on Optical Micro-Manipulation by Nonlinear Nanophotonics, Ischia (Italy) September 2nd to 5th 2008.
58. J. Zyss, Tutorial lecture on *Nanobio convergence* (Plenary) at the France-Japanese meeting (Journée Francophone de la Recherche 2008, 28/11/2008) Komaba campus, Tokyo University
59. J. Zyss: *Multiphoton processes to engineer functional molecular nonlinear materials at will* Two lectures at the Nato Advanced Study Institute (ASI-2008) in *Laser Control and Monitoring in New Materials, Biomedicine, Environment, Security and Defence*, Ottawa, November 24th-to December 5th 2008.

60. Frédéric Grosshans, Ngoc Diep Lai, François Treussart, et Jean-François Roch “Utilisation des centres colorés du diamant pour l'information quantique”, Qubits pour le calcul : l'état des lieux, Observatoire des Micro et NanoTechnologies, Grenoble, 1^{er} octobre 2008
61. N. D. Lai, D. Zheng, F. Jelezko, F. Treussart, and J.-F. Roch, “Experimental investigation of optically detected magnetic resonance of multiple and single NV spin in diamond”, XIIth International Conference on Quantum Optics and Quantum Information, ICQO'2008, Vilnius (Lituanie), 20-23 septembre 2008.
62. Jean-François Roch, “Single color centers in nanodiamonds”, Physics of Quantum Electronics, Snowbird (Etats-Unis), 7-10 janvier 2008.
63. François Treussart, “Diamond nanoparticles as photoluminescent nanoprobe”, ICL'08, Lyon (France), 7-9 juillet 2008.
64. Jean-François Roch, “Photoluminescent nanodiamonds”, Trends in Nanotechnology – TNT'2007, San Sebastian (Espagne), 3-7 septembre 2007.
65. Jean-François Roch, “Diamond color centers as practical single-photon sources”, Quantum Diamond Workshop, Melbourne (Australie), 15-18 juillet 2007.
66. Jean-François Roch, “Realisation of Wheeler's delayed-choice gedanken experiment”, The Ninth Rochester Conference on Coherence and Quantum Optics CQO9, Rochester (Etats-Unis), 10–13 juin 2007.
67. Vincent Jacques, “Experimental realization of Wheeler's delayed-choice gedanken experiment”, ICONO/LAT 2007 Conference, Minsk (Biélorussie), 28 mai–1 juin 2007.
68. Jean-François Roch, “Color centers in diamond as practical single-photon sources”, MRS 2006 Fall Meeting, Boston (Etats-Unis), 27 novembre – 1er décembre 2006.
69. Jean-François Roch, “Color centers in diamond as practical single-photon sources”, Ieee Leos Topical meeting “Quantum communications in telecom networks”, Quebec (Canada), 17–19 juillet 2006.
70. Jean-François Roch, “Color centers in diamond as practical single-photon sources”, Plenary conference, Diamond 6, Estoril (Portugal), 3–8 septembre 2006.
71. Jean-François Roch, “Single photons from colour centre emission in diamond”, International Conference on Quantum Optics ICQO'06, Minsk (Biélorussie), 27-30 mai 2006.
72. Security of Continuous Variable Quantum Cryptography against Collective Attacks, F. Grosshans, présentation orale au *SECOQC QIT meeting*, Vienne, 6-10 mars 2006.

ACT

Communications avec actes dans un congrès international ou national

1. B. Journet, C.T. Nguyen, L.T. Xiao, X.Q. Dinh, D.M. Vu, V.L. Vu, Simultaneous transmission of faint laser pulses and of synchronization signal at 1.55 μm for secured optical transmission, *Opto 2005, Integrated Optoelectronics Devices, Proceeding of SPIE*, Vol. 5726-30, San Jose, California, 24-29 Jan. 2005.
2. G. Gaborit, G. Martin, L. Duvalleret, J.-L. Coutaz, C. T. Nguyen, R. Hierle, J. Zyss, Organic Fabry-Pérot microcavity for electro-optic sampling by amplitude modulation, *ICONO/LAT 2005*, St Petersburg, 11-15 Mai 2005.
3. F. Duport, C. T. Nguyen, R. Hierle, B. Journet, P. Labbé, J. Zyss, Design of an optical to microwave converter based on electro-optic polymer material, *Optics East, Proceeding of SPIE*, Boston, Oct. 2005.
4. F. Duport, C. T. Nguyen, R. Hierle, B. Journet, P. Labbé et J. Zyss, Composant polymère pour la conversion à ondes progressives optique-hyperfréquence, *Horizons de l'Optique*, Actes des Conférences, pp. 68-69, Chambéry, 8-10 novembre 2005.

5. C. T. Nguyen, A. Clouquer, R. Hierle, B. Journet, P. Labbé, J. Zyss, Stabilization of the bias point of an electro-optic modulator based on polymer material, *Opto 2006, Integrated Optoelectronic Devices, Organic Photonic Materials and Devices VIII, Proceeding of SPIE*, Vol. 6117-47, San Jose, 21-26 Jan. 2006.
6. F. Duport, C. T. Nguyen, R. Hierle, B. Journet, P. Labbé, J. Zyss, Optical to microwave conversion in a travelling wave electro-optic polymer based device, *Opto 2006, Integrated Optoelectronic Devices, Organic Photonic Materials and Devices VIII, Proceeding of SPIE*, Vol. 6117-39, San Jose, 23-26 Jan. 2006.
7. A.Bréhier, R. Parashkov, J.-S. Lauret, C. T. Nguyen, I. Ledoux, E. Deleporte, S. Bouchoule, X. Lafosse, M. Leroux, Perovskite organic semiconductor: a way to hybrid microcavities, *Proceeding of the 28th International Conference on the Physics of Semiconductors*, Vienna, Austria, pp. 353-354, July 2006, DOI:10.1063/1.2729912.
8. Bréhier, R. Parashkov, D. Josse, C. T. Nguyen, I. Ledoux, E. Deleporte, J.-S. Lauret, J. Wenus, D.G. Lidzey, Third harmonic generation measurements on organic semiconductor films, *Proceeding of the 28th International Conference on the Physics of Semiconductors*, Vienna, Austria, pp.369-370, July 2006, DOI:10.1063/1.2729920.
9. F. Duport, C. T. Nguyen, R. Hierle, B. Journet, P. Labbé, J. Zyss, Design of a new photomixer based on electro-optic polymer, *Proceeding of the MWP'06 International Topical Meeting on Microwave Photonics*, Grenoble, France, 3-6 October 2006, DOI:10.1109/MWP.2006.346539.
10. "UV microcavity polaritons at room temperature", G. Lanty, A. Bréhier, J.S. Lauret, E. Deleporte, S. Bouchoule, X. Lafosse, *Proceedings of ICL'08 (15th International Conference on Luminescence and Optical Spectroscopy of Condensed Matter)*.
11. "Perovskite organic semi-conductor: a way to hybrid microcavities", A. Brehier, R. Parashkov, J.S. Lauret, C.T. Nguyen I. Ledoux, S. Bouchoule, X. Lafosse, M. Leroux and E. Deleporte, *Proceedings of ICPS28 (International Conference on the Physics of Semiconductors; July 24-28,2006, Vienna, Austria)*
12. "Third Harmonic generation measurements on organic semiconductor films" , A. Brehier, R. Parashkov, C.T. Nguyen, D. Josse, I. Ledoux, E. Deleporte, J.S. Lauret, J. Wenus and D.G. Lidzey, *Proceedings of ICPS28 (International Conference on the Physics of Semiconductors; July 24-28,2006, Vienna, Austria)*
13. "Preparation and characterisation of hybrid organic-inorganic perovskite type thin-films" ,R. Parashkov, A. Brehier, J.S. Lauret, C.T. Nguyen and E. Deleporte ,*Proceedings of ICOE05 (International conference on organic electronics, Eindhoven, Pays Bas ; 20-22 Juin 2006)*
14. E Wu, J. R. Rabeau, F. Treussart, H. Zeng, P. Grangier, S. Prawer, and J.-F. Roch, *Nonclassical photon statistics in a single nickel-nitrogen diamond color centre photoluminescence at room temperature*, J. Mod. Opt., sous presse (2008).
15. V. Jacques, E Wu, F. Grosshans, F. Treussart, A. Aspect, Ph. Grangier, and J.-F. Roch, *Wheeler delayed-choice thought experiment: Experimental realization and theoretical analysis*, Ann. Phys. (France) 32, vol. 2-3, 195-197 (2007).
16. J. D. Murray, V. Jacques, F. Marquier, D. Chauvat, F. Grosshans, F. Treussart and J.-F. Roch, *Improvement of photostability using feedback from single-molecule fluorescence time trace*, Ann. Phys. (France) 32, vol. 2-3, 135-138 (2007).
17. Zhou, E Wu, J. Rabeau, V. Jacques, F. Treussart, H. Zeng, S. Prawer, P. Grangier et J.-F. Roch, *Triggered single-photon source based on photoluminescence of Nickel-related colour centres in CVD-grown nanodiamonds*, Ann. Phys. (France) 32, vol. 2-3, 159-161 (2007).
18. L. Le Xuan , C. Zhou, A. Slablab, D. Chauvat and J.-F. Roch, *Investigation of KTiOPO4 nanocrystals by means of second-harmonic light emission*, Ann. Phys. (France) 32, vol. 2-3, 99–101 (2007).

19. J.-F. Roch, V. Jacques, E Wu, F. Grosshans, F. Treussart, P. Grangier and A. Aspect, *Wave Particle-Duality with a Single Photon: Experimental Realization of Wheeler's Delayed-Choice Gedanken Experiment*, Proceedings of the Rochester Conference on Coherence and Quantum Optics 9 edited by N. P. Bigelow, J. H. Eberly, and C. R. Stroud (Optical Society of America), 289-298 (2007).
20. V. Jacques, S. Régnier, D. Chauvat, J.-F. Roch, *Color Centers in Diamond as Practical Single-Photon Source to Illustrate Quantum Complementarity*, in *Diamond Electronics - Fundamentals to Applications*, edited by P. Bergonzo, R. Gat, R.B. Jackman, C.E. Nebel (Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 956, Warrendale, PA, 2007), 0956-J02-01.
21. E Wu, V. Jacques, F. Treussart, H. Zeng, P. Grangier and J.-F. Roch, *Diamond-based single-photon emission in the near infrared*, J. Phys. IV (France) 135, 153-154 (2006).
22. V. Jacques, E Wu, T. Toury, F. Treussart, A. Aspect, P. Grangier, and J.-F. Roch, *Interférences à un photon avec un biprisme de Fresnel*, J. Phys. IV (France) 135, 197-198 (2006).

COM

Communications orales sans actes dans un congrès international ou national

1. N. Djellali, M. Lebental, R. Dubertrand, C. Schmit, E. Bogomolny, J. Zyss, *Spectra and periodic orbits in organic micro-lasers* ICTON, Athènes (Grèce), 22-26 juin 2008.
2. M. Lebental, C. Arnaud, J.S. Lauret, J. Zyss, C. Schmit, E. Bogomolny, *Tailored shapes of organic micro-lasers: a testbed for wave chaos physics*, Advanced polymer materials for photonics and electronics, Prague (République Tchèque), 15-19 juillet 2007.
3. M. Lebental, J.S. Lauret, J. Zyss, C. Schmit, and E. Bogomolny, *Quantum chaos and organic microlasers FRISNO 9*, Les Houches (France), février 2007.
4. M. Lebental, J.S. Lauret, J. Zyss, C. Schmit, and E. Bogomolny, *Chaotic behavior of laser emission in organic microcavities*, CLEO/QELS 2006, Long Beach (California USA), Mai 2006
5. I. Ledoux, I. Ledoux, A.Q. Le Quang, J. Zyss, « Engineering luminescence molecules and nanostructures with nonlinear properties and infrared (Erbium range 1.55 μm) properties », MIT - ENS Cachan workshop on molecular photonics and biophotonics, Boston MIT, USA, 11-12 Octobre 2004
6. A.Q. Le Quang, R. Hierle, J. Zyss, I. Ledoux, E. Besson, A. Mehdi, C. Reyé, R. Corriu, « Polymères dopés par des complexes d'erbium multifonctionnels » JNOG, 2005, Chambéry, 8-10 Novembre 2005.
7. Katarzyna Komorowska, S. Brasselet, I. Ledoux, J. Zyss, L. Poulsen, M. Jazdyk, H.-J. Egelhaaf, J. Gierschner, M. Hanack, « Nanometric Scale Investigation Of Perhydrotriphenylene Inclusion Compounds By Nonlinear Microscopy », 8th European Conference on Molecular Electronics – ECME8, CNR Area della Ricerca, Bologna, Italy, 29 June - 2 July, 2005
8. A.Q. Le Quang, R. Hierle, J. Zyss, I. Ledoux, E. Besson, A. Mehdi, C. Reyé, R. Corriu, « Elaboration of polymer-based materials and waveguides doped with erbium complexes for amplification at 1,55 μm : a multifunctional approach », Photonics West 2005, San Jose, USA, 21-26 janvier 2006.
9. A.Q. Le Quang, J. Zyss, I. Ledoux, V.G. Truong A-M. Jurdyc, B. Jacquier, « An hybrid organic-inorganic approach to erbium-functionalized nanodots for emission in the telecom window », Photonics West 2005, San Jose, USA, 21-26 janvier 2006
11. A.Q. Le Quang, I. Ledoux, J. Zyss, S. Piertralunga. « Demonstration of net gain at 1540 nm in an erbium-doped polymer single mode rib waveguide » (communication orale). The Conference on Lasers and Electro-Optics, 21-26 Mai 2006, Long Beach, California, USA.
12. A.Q. Le Quang, I. Ledoux, J. Zyss, E. Lifshitz. « Lasing properties of PbSe quantum dots doped PMMA polymer for infrared optical amplification ». (communication orale), Conference of Nanophysics: from fundamentals to applications, 6-12 Août 2006, Hanoi, Vietnam.

13. G. Lanty, A. Bréhier, J.S. Lauret, E. Deleporte, S. Bouchoule, X. Lafosse : UV microcavity polaritons at room temperature, 15th International Conference on Luminescence and Optical Spectroscopy of Condensed Matter (ICL'08), 7-11 juillet 2008, Lyon, France.
14. P. Jaffrennou, J. Barjon, J. S. Lauret, B. Attal-Trétout, F. Ducastelle and A. Loiseau : Optical properties of Boron Nitride Nanotubes - MRS Fall 2007, Boston (USA), 26-29 Novembre 2007.
15. P. Jaffrennou, J. Barjon, J. S. Lauret, B. Attal-Trétout, F. Ducastelle and A. Loiseau : Optical properties of Boron Nitride Nanotubes- GDRI Nanotubes, Autrans, 16-19 Octobre 2007.
16. P. Jaffrennou, J. Barjon, B. Attal-trétout, F. Ducastelle, and A. Loiseau : Optical properties of hBN and BN nanotubes – Topical meeting on Optical properties of Carbon Nanotubes, 29-30 Mai 2007.
17. P. Jaffrennou, J. Barjon, J. S. Lauret, B. Attal-Trétout, F. Ducastelle and A. Loiseau : Propriétés de luminescence du hBN et des BNNTs- JMC10, Toulouse, 28 Août-1 Sept. 2006
18. R. Parashkov, A. Bréhier, J.S. Lauret, E. deleporte, X. Lafosse and S. Bouchoule : Exciton-photon polaritons in planar microcavities containing perovskite organic/inorganic quantum wells, 2007 MRS Spring Meeting, 9-13 avril, San Francisco, Unites States
19. A. Brehier, R. Parashkov, J.S. Lauret, C.T. Nguyen I. Ledoux, S. Bouchoule, X. Lafosse, M. Leroux and E. Deleporte "Perovskite organic semi-conductor: a way to hybrid microcavities" ; International Conference on the Physics of Semiconductors; July 24-28,2006, Vienna, Austria)
20. A. Brehier, R. Parashkov, C.T. Nguyen, D. Josse, I. Ledoux-Rak, E. Deleporte, J.S. Lauret, J. Wenus and D.G . Lidzey : Third harmonic generation measurements on organic semiconductor films, 28th International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS-28), July 24-28, 2006, Vienna, Austria.
21. R. Parashkov, A. Brehier, J.S. Lauret, C.T. Nguyen and E. Deleporte "Preparation and characterisation of hybrid organic-inorganic perovskite type thin-films" International conference on organic electronics, Eindhoven, Pays Bas ; 20-22 Juin 2006
22. A. Bréhier, R. Parashkov, J.S. Lauret and E. Deleporte : Strong exciton-photon coupling in planar microcavities containing perovskite organic semiconductors, European Optical Society annual meeting, 17-19 October 2006, Pris, France
23. A. Bréhier, R. Parashkov, J.S. Lauret and E. Deleporte : Strong exciton-photon coupling in planar microcavities containing perovskite organic semiconductors, Grenoble's International Meeting in Molecular Electronics (ElecMol'06), 11-15 December 2006, Grenoble, France.
24. S. Brasselet, "Polarization information and manipulation in nonlinear microscopy" Workshop on imaging in complex media (Gstaad , Suisse) (2007)
25. S. Brasselet, "Nonlinear microscopy in nano-objects"ECONOS (Igls Insbruck, Austria) (2007)
26. S. Brasselet, « Orientation photoinduite de molécules dans les polymères : de l'échelle macroscopique à la molécule unique » Photostructuration de matériaux organiques : effets optiques et électro-optiques (FOCALE) (Rennes, France) (2006)
27. S. Brasselet, "Nonlinear imaging of molecular assemblies" 1st French Israel Meeting on Nano-biophotonics and Biotechnology (Eilat, Israel), (2005)
28. S. Brasselet, "Photo-induced rotation of single molecules" SPIE'05, Nanophotonics symposium "Physical Chemistry of Molecules and Interfaces (San Diego, USA),(2005)
29. S. Brasselet, "Photo-induced orientation: from nonlinear optical storage to single molecule rotation" Workshop on Molecular Nano-Photonics for Biology and Applications, National Taiwan University (Taipei, Taiwan) (2005)
30. S. Brasselet, "Photo-induced rotation of single molecules"8th French Israeli Symposium on Nonlinear and Quantum Optics (FRISNO8) (Ein Bokek, Israel) (2005)
31. H. Mojziso, J. Olesiak, M. Zielinski, D. Chauvat, K. Matczyszyn, J. Zyss, "L'analyse polarimétrique de l'organisation de l'ADN en phase de cristaux liquides", MiFoBio3, Carqueiranne

(2008).

32. S. Brasselet, D. Chauvat, N. Sandeau, and J. Zyss, "Phase and polarization sensitive schemes in nonlinear confocal imaging: applications to molecular and bio systems", Spring Janelia Conference: Novel approaches to Bio-imaging, HHMI, Janelia Farm, USA (2008).
33. N. Sandeau, L. Le Xuan, D. Chauvat, J.-F. Roch, A. Bentley, P. Tauc, S. Brasselet, "Crystallinity diagnostics and 3d-orientation measurements of single nanocrystals by nonlinear microscopy" Focus on Microscopy, Valencia, Spain (2007).
34. N. Sandeau, L. Le Xuan, D. Chauvat, J.-F. Roch, J. Zyss, S. Brasselet, "Coherent defocused orientation of nano-crystals in second-harmonic generation microscopy", Frisno 9, Les Houches (2007).
35. Jacob Szeftel and Guo Xiang Huang "Microwave acoustoelectric soliton in piezoelectric semiconductors", *Dynamics Days Asia Pacific 4*, Pohang, Corée du Sud ,12-14 juillet 2006,
36. Frédéric Grosshans, Vincent Jacques, Jean-François Roch, "Entropy of a continuous variable quantum random number generator", International Symposium for young researchers: "Quantum manipulation of Photons and Atoms, Beijing, 14–18 Octobre 2008 et Shanghai, 20–22 Octobre 2008
37. N. D. Lai, D. Zheng, F. Jelezko, F. Treussart, and J.-F. Roch, "Experimental investigation of optically detected magnetic resonance of multiple and single NV electron spin in diamond", Réunion plénière GDR du GDR Diamant, Orsay (France), 13-15 octobre 2008.
38. C. Zhou, I. Aharonovich, F. Treussart, S. Praver, and J.-F. Roch, "Observation of single-photon emission in Nickel doped CVD-grown nanodiamonds", Réunion plénière du GDR Diamant, Orsay (France), 13-15 octobre 2008.
39. Frédéric Grosshans, Vincent Jacques, Jean-François Roch, "Entropy of a continuous variable quantum random number generator", Colloque général du GdR Information et Communications Quantique, Université Paris 7, 6–8 octobre 2008
40. O. Faklaris, D. Garrot, V. Joshi, J.-P. Boudou, T. Sauvage, F. Druon, P. Georges, P. Curmi, and F. Treussart « *Photoluminescent diamond nanoparticles as an innovative marker to study intracellular processes* », European Optical Society Annual Meeting 2008, paris (France), 29 septembre – 2 octobre 2008.
41. Frédéric Grosshans, Vincent Jacques, Jean-François Roch, "Entropy of a continuous variable quantum random number generator", Third Russian-French Laser-Physics Workshop for Young Scientists, Saint Pétersbourg, Russie, 22–26 septembre 2008.
42. O. Faklaris, D. Garrot, V. Joshi, J.-P. Boudou, T. Sauvage, F. Druon, P. Georges, P. Curmi, and F. Treussart, «*Diamond Nanoparticles as Photoluminescent Nanoprobes for Biology*», Nano-objects in living cells, from physics to physiology, Lille (France), 1-4 septembre 2008.
43. C. Zhou, E Wu, I. Aharonovich, J. Rabeau, F. Treussart, S. Praver, and J.-F. Roch, "Fabrication of Nickel doped individual color centers in CVD-grown nanodiamonds and observation of their single-photon emission", 13th Chinese National Symposium on Quantum Optics, Kunming (Chine), 25-28 Juillet 2008.
44. N. D. Lai, D. Zheng, F. Jelezko, F. Treussart, and J.-F. Roch, "Optically detected magnetic resonance of a single electron spin in nanodiamond", 2nd International Conference on New Diamond and Nano Carbons (NDNC'2008), Taipei (Taiwan), 26-29 mai 2008.
45. V. Jacques, "Delayed-choice test of quantum complementarity with interfering single photons", New Frontiers in Micro and Nano Photonics, Florence (Italie), 23-26 avril 2008.
46. V. Jacques, "Enhancing single-molecule photostability by optical feedback from quantum jump detection", New Frontiers in Micro and Nano Photonics, Florence (Italie), 23-26 avril 2008.
47. L. Le Xuan, "Photostable Single KTiOPO4 Nanocrystals for Second-Harmonic Generation Microscopy", Optical MEMS and Nanophotonics 2007, Hualien (Taiwan), 12-16 août 2007. .

48. V. Jacques, “Enhancing single-molecule photostability by optical feedback from quantum jump detection”, Workshop Franco-indien CEFIPRA 07, Gif-sur-Yvette (France), 29 oct.-2 nov. 2007.
49. V. Jacques, “Colour centers in diamond as practical single-photon source”, European Young Scientists Conference on Quantum Information, Vienne (Autriche), 27-31 août 2007.
50. V. Jacques, “Experimental realization of Wheeler's delayed-choice gedanken experiment”, CLEO Europe IQEC 2007, Munich (Allemagne), 17-22 juin 2007.
51. C. Zhou, “Investigation of KTiOPO₄ nanometric-sized crystals as an in-situ nonlinear nanosource by means of second-harmonic light emission”, OSA Topical Conference on Nanophotonics, Hangzhou (Chine), 18-21 juin 2007.
52. E. Wu, F. Treussart, H. Zeng, J.-F. Roch, J. Rabeau, S. Praver, “Photoluminescence study of Nickel-related colour centers in CVD-grown nanodiamonds”, Hasselt Diamond Workshop, Hasselt (Belgique), 28 février-2 mars 2007.
53. E. Wu, V. Jacques, F. Treussart, J. R. Rabeau, S. Praver, H. Zeng, P. Grangier, and J.-F. Roch, “Triggered single-photon source based on photoluminescence of Nickel-related colour centres in CVD-grown nanodiamonds”, Single-Photon Workshop 2007 : Sources, Detectors, Applications and Measurement Methods, Turin (Italie), 25-28 septembre 2007.
54. F. Treussart, O. Faklaris, A. Elli, V. Joshi, J.-P. Boudou, T. Sauvage, P. Curmi and J.-F. Roch, “Diamond nanoparticles as photoluminescent nanoprobe for biology”, MRS Fall Meeting (Symposium P: Diamond Electronics--Fundamentals to Applications II), Boston (Etats-Unis) 26-29 novembre 2007.
55. F. Treussart, E. Wu, V. Jacques, J. R. Rabeau, H. Zeng, S. Praver, P. Grangier, and J.-F. Roch, “Triggered single-photon source based on photoluminescence of Nickel-related colour centres in CVD-grown diamond”, MRS Fall Meeting (Symposium P: Diamond Electronics--Fundamentals to Applications II), Boston, (MA, USA) 26-29 novembre 2007.
56. O. Faklaris, V. Joshi, J.-P. Boudou, T. Sauvage, J.-F. Roch, P. Curmi, and F. Treussart, “Diamond nanoparticles as markers of biomolecules in cell”, Colloque Franco-indien - Indo-French Centre for the Promotion of Advanced Research (IFCPAR/CEFIPRA) workshop on “Lasers, quantum optics and Biophysics”, Gif-sur-Yvette (France), 29 octobre-2 novembre 2007.
57. O. Faklaris, V. Joshi, J.-P. Boudou, P. Curmi, and F. Treussart, « *Diamond Nanoparticles as markers and vectors of biomolecules* », colloque MPCVDiam, Grenoble (France), 22-23 mars 2007.6
58. L. Le Xuan, “Balanced homodyne detection of second harmonic generation in nonlinear microscopy”, Micro- to Nano-Photonics - ROMOPTO 2006, Sibiu (Roumanie), 28-31 août 2006.
59. V. Jacques, “Experimental realization of Wheeler's delayed-choice gedanken experiment”, Asian Conference on Quantum Information Science, AQIS'06, Beijing (Chine), 1-4 sept. 2006.
60. D. Chauvat, “Coherent detection of second harmonic generation in nonlinear optics”, Nanophotonics - SPIE 2006, Strasbourg (France), 3-5 avril 2006.
61. O. Faklaris, J. Wang, V. Joshi, D. Pastré, C. Tard, S. Perruchas, T. Gacoin, J.-P. Boudou, F. Treussart, and P. Curmi, “Photoluminescent diamond nanoparticles for biomolecules delivery”, Topical Meeting “Biophotonics and Biomedical Optics”, European Optical Society annual meeting, Paris (France), 16-19 octobre 2006.
62. T. Coudreau, F. Grosshans, S. Guibal et L. Guidoni, *Ions piégés : un nouveau milieu pour l'information quantique en variables continues*; présentation orale au *Colloque thématique du GdR Information et Communication Quantique*, Palaiseau, 19-20 octobre 2005.

AFF

Communications par affiche dans un congrès international ou national

1. L. Badie, C. T. Nguyen, I. Ledoux-Rak, A. Kigel and E. Lifshitz, Gain properties of PbSe quantum dots in PMMA matrix in the NIR wavelength range, 3rd Annual Workshop on Advances in Nanophotonics, NoE Phoremest, 13-15 September 2007, Istanbul, Turkey.

2. S. Michel, J.-P. Abid, C. T. Nguyen, I. Ledoux-Rak, J. Zyss and M. Abid, Design of electrical integrated tunable Mach-Zehnder modulator for telecommunication systems and future prospects in biosensing applications, *2007 International Conference on Bionano Science*, Taipei, Taiwan, December 2007.
3. S. Stepanov, S. Ruschin, J. Zyss and I. Ledoux, Tubular dye-polymer waveguides embedded in silicon, FRISNO8, Ein Bokek, Israel - February 20-25, 2005.
4. A.Q. Le Quang, L. Badie, I. Ledoux, J. Zyss, S. Piertralunga. "Demonstration of net gain at 1550 nm in an erbium-doped polymer single mode rib waveguide". (Poster) PhOREMOST – 2nd Annual Workshop : Advances in Nanophotonics, Vilnius, Lituanie, 25-27 septembre 2006. Ce poster a reçu le 1^{er} prix décerné par ce Workshop.
5. A. Q. Le Quang, I. Ledoux-Rak, J. Zyss, M. Brumer, A. Kigel, A. Sashchiuk, M. Bashouti and E. Lifshitz, Amplification properties of PbSe quantum dots doped polymer films in the telecommunication spectral window, (poster), FRISNO9, Les Houches, 12-16 février 2007.
6. B. Hajj, A. Quatela, D. Chauvat, J. Zyss, " Electro-optic confocal microscopy: a new sensitive and specimen friendly electrical imaging technique for physics and biology", Spring Janelia Conference: Novel approaches to Bio-imaging, HHMI, Janelia Farm, USA (2008).
7. S. Brasselet, N. Sandeau, K. Komorowska, S.S. Lee, C.T. Lin, D. Chauvat, L. Le Xuan, J.-F. Roch, and J. Zyss, "Sondes d'arrangements moléculaires par microscopie nonlinéaire polarisée", Journée SFO club Photonique et Sciences du Vivant, Paris (2006).
8. N. D. Lai, V. Jacques, A. Dréau, D. Zheng, D. Chauvat, F. Treussart, P. Grangier, and J.-F. Roch, "Illustration of quantum complementarity using single photons interfering on a grating", XII International Conference on Quantum Optics and Quantum Information, ICQO'2008, Vilnius (Lituanie), 20-23 septembre 2008.
9. N. D. Lai, V. Jacques, A. Dréau, D. Zheng, D. Chauvat, F. Treussart, P. Grangier, and J.-F. Roch, "Illustration of quantum complementarity using single photons interfering on a grating", Colloque final du GdR "Information et Communication Quantique", Paris (France), 6-8 octobre 2008.
10. N. D. Lai, D. Zheng, F. Jelezko, F. Treussart, and J.-F. Roch, "Experimental investigation of optically detected magnetic resonance of multiple and single NV electron spin in diamond", Colloque final du GdR "Information et Communication Quantique", Paris (France), 6-8 octobre 2008.
11. C. Zhou, E Wu, I. Aharonovich, J. Rabeau, F. Treussart, S. Praver, and J.-F. Roch, "Realization of an efficient single-photon source by plasma assisted diffusion of Nickel impurities in CVD-grown nanodiamonds", Colloque final du GdR "Information et Communication Quantique", Paris (France), 6-8 octobre 2008.
12. L. Le Xuan, A. Slablab, C. Zhou, D. Chauvat, Y. De Wilde, S. Perruchas, C. Tard, T. Gacoin, P. Villeval, and J.-F. Roch, "Single KTiOPO4 nanocrystals for nonlinear probing of local optical fields and interaction with a metallic nanostructure", EOS Annual Meeting 2008, Villepinte (France), 29 September-02 October 2008.
13. L. Le Xuan, A. Slablab, D. Chauvat, F. Treussart, J.-F. Roch, T. Gacoin, S. Perruchas, J.-P. Boileau, Y. De Wilde, P.-A. Lemoine et E. Sepulveda, "Sonde optique de champ proche à base de nanocristaux linéaires et non-linéaires", JMC 11, Strasbourg (France), 25-29 August 2008.
14. C. Zhou, L. Le Xuan, A. Slablab, D. Chauvat, J.-F. Roch, "Investigation of KTiOPO4 nanocrystals for nonlinear probing of electric optical fields", 13th Chinese National Symposium on Quantum Optics, Kunming (Chine), 25-28 Juillet 2008.
15. O. Faklaris, D. Garrot, Y. Sonnefraud, A. Cuche, T. Sauvage, V. Joshi, J.P. Boudou, P. Curmi, J.-F. Roch, S. Huant, F. Treussart, "Diamond nanoparticles as photoluminescent nanoprobe", SBDD-XIII, Hasselt (Belgique), février 2008.

16. L. Le Xuan, C. Zhou, A. Slablab, D. Chauvat, N. Sandeau, F. Treussart, S. Brasselet, J.-F. Roch, C. Tard, S. Perruchas, et T. Gacoin, "Génération de second harmonique par un nanocristal unique de KTiOPO_4 ", Coloq'10, Grenoble (France), 02-05 juillet 2007.
17. V. Jacques, E Wu, F. Grosshans, F. Treussart, A. Aspect, P. Grangier, and J.-F. Roch "Wheeler delayed-choice thought experiment: Experimental realization and theoretical analysis", Coloq'10, Grenoble (France), 02-05 juillet 2007.
18. O. Faklaris, Y. Sonnefraud, A. Cuhe, T. Sauvage, V. Joshi, J.-P. Boudou, P. Curmi, J.-F. Roch, S. Huant, and F. Treussart, "Diamond nanoparticles as photoluminescent nanoprobe", Coloq'10, Grenoble (France), 02-05 juillet 2007.
19. J. D. Murray, V. Jacques, F. Marquier, D. Chauvat, F. Grosshans, F. Treussart, and J.-F. Roch "Improvement of photostability using feedback from single-molecule fluorescence time trace", Coloq'10, Grenoble (France), 02-05 juillet 2007.
20. C. Zhou, E Wu, J. Rabeau, V. Jacques, F. Treussart, H. Zeng, S. Prawer, P. Grangier, and J.-F. Roch "Triggered single-photon source based on photoluminescence of Nickel-related colour centres in CVD-grown nanodiamonds", Coloq'10, Grenoble (France), 02-05 juillet 2007.
21. L. Le Xuan, N. Sandeau, C. Zhou, D. Chauvat, F. Treussart, S. Brasselet, J.-F. Roch, C. Tard, S. Perruchas, T. Gacoin, "Investigation of the second-harmonic light emission by KTiOPO_4 nanometric-sized crystals as an in situ nonlinear nanosource", World of Photonics Congress 2007, CLEO/Europe-IQEC Conference, poster JSII-8-WED Munich (Germany), 17-22 juin 2007.
22. L. Le Xuan, D. Chauvat, F. Marquier, F. Treussart, S. Brasselet and J.-F. Roch, "Balanced homodyne detection of the second-harmonic radiation emitted by inorganic nano-crystals", HBSM 2006, Aussois (France), 24-29 juin 2006.
23. O. Faklaris, J. Wang, V. Joshi, D. Pastré, C. Tard, S. Perruchas, T. Gacoin, J.-P. Boudou, F. Treussart, and P. Curmi, "Photoluminescent diamond nanoparticles for targeted biomolecule delivery", HBSM 2006, Aussois (France), 24-29 juin 2006..
24. O. Faklaris, J. Wang, V. Joshi, D. Pastré, C. Tard, S. Perruchas, T. Gacoin, J.-P. Boudou, F. Treussart, and P. Curmi, "Photoluminescent diamond nanoparticles for biomolecule delivery", 3rd Workshop on Nanosciences & Nanotechnologies , Thessalonique (Grèce), 10-12 juillet 2006.
25. E Wu, V. Jacques, F. Treussart, H. Zeng, P. Grangier, and J.-F. Roch, "Diamond-based single-photon emission in the near infrared", Coloq'9, Dijon (France), 07-09 septembre 2005.
26. V. Jacques, E Wu, T. Toury, F. Treussart, A. Aspect, P. Grangier, and J.-F. Roch, "Interférences à un photon avec un biprisme de Fresnel", Coloq'9, Dijon (France), 07-09 septembre 2005.

OS

Ouvrages scientifiques (ou chapitres de ces ouvrages)

1. J. Szeftel, "Quantum Anharmonic Phonons in the Fermi-Pasta-Ulam Chain" , [*Nonlinear Waves: Classical and Quantum Aspects*](#), NATO Science Series, Volume 153, P. 481-487 (2005)
2. "Preparation and characterisation of perovskite type thin-films" , Parashkov R, Bréhier A, Georgiev A, Bouchoule S, Lafosse X, Lauret J S, Nguyen C T, Leroux M and Deleporte E, *Advanced Materials: Research Trends*, ed L A Basbanes (New York: Nova Science Publishers) chapter 4, pp 119–37 (2007)
3. V. Jacques, S. Régnier, D. Chauvat, J.-F. Roch, "Color Centers in Diamond as Practical Single-Photon Source to Illustrate Quantum Complementarity", in *Diamond Electronics - Fundamentals to Applications*, edited by P. Bergonzo, R. Gat, R.B. Jackman, C.E. Nebel (Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 956, Warrendale, PA, 2007), 0956-J02-01.
4. *Continuous Variable Quantum Key Distribution*, F. Grosshans, A. Acin, N. J. Cerf, chapitre du livre *Quantum Information with continuous variables of atoms and light*, Eds. N. Cerf, G. Leuchs, E.S. Polzik à paraître chez *Imperial College Press* (2007).

5. *Organic micro-lasers: a new avenue onto wave chaos physics*, Melanie Lebental, Eugene Bogomolny, Joseph Zyss, Review Chapter in edited book "Practical applications of microresonators in optics and photonics" (ed. A. Matsko) (to appear in 2008)

OV

Ouvrages de vulgarisation (ou chapitres de ces ouvrages)

DO

Directions d'ouvrages

AP

Autres publications

TH

Thèses soutenues

1. Patrice Nagtegaele : « Micro-résonateurs circulaires à base de polymères pour fonctions d'insertion-extraction en télécommunications optiques », (Directeur de thèse : Joseph Zyss) 18 Janvier 2005, ENS Cachan, Ecole Doctorale des Sciences Pratiques (EDSP).
2. Ngan Nguyen Thi Kim. "*Étude dynamique à deux et trois dimensions de la photo-orientation de molécules de colorants optiquement non-linéaires dans des films de polymères. Application à la Polarisation Tout-Optique,*" (Directeur de thèse : Michel Dumont) soutenue le 2/11/2005, ENS Cachan, EDSP.
3. Niicolas TANCREZ, « *Étude de non linéarités optiques à différentes échelles : de la molécule aux nanostructures* » (Directeur de thèse : Isabelle Ledoux) soutenue le 20 juillet 2005 à l'ENS Cachan, EDSP.
4. Timothée Toury « La microscopie électro-optique : étude, conception, applications », (Directeur de thèse : Joseph Zyss) soutenue le 6 décembre 2005 à l'ENS Cachan, EDSP.
5. Anh Quoc LE QUANG, « *Matériaux et guides d'ondes à base de polymères dopés erbium pour l'amplification optique à 1550 nm* » (Directeur de thèse : Isabelle Ledoux) soutenue le 13 juillet 2006 à l'ENS Cachan, EDSP
6. E Wu, « Génération de photons uniques par des nanoparticules de diamants à centres NE 8 », thèse en cotutelle entre l'ENS Cachan (directeur de thèse : Jean-François Roch) et l'East China Normal University - Shanghai (directeur de thèse: Heping Zeng). Thèse soutenue à Shanghai le 1er novembre 2007 à Shanghai . Il s'agit d'une thèse de l'EDSP.
7. Mélanie Lebental : « Dynamique non-linéaire dans les microcavités laser à modes de galerie » (Directeur de thèse : Joseph Zyss) soutenue le 17 septembre 2007, ENS Cachan, EDSP
8. Antoine Bréhier, "Puits quantiques hybrides organiques-inorganiques de pérovskites pour le couplage fort à température ambiante" (Directeur de thèse : Emmanuelle Deleporte), 17 décembre 2007, ENS Cachan, EDSP.
9. Vincent Jacques : « Source de photons uniques et interférences à un seul photon. De l'expérience des trous d'Young au choix retardé » (Directeur de thèse : Jean-François Roch), 13 novembre 2007, ENS Cachan, EDSP
10. François Duport: « Conversion optique micro-onde hyper par redressement électrooptique » (Directeur de thèse : Joseph Zyss) (soutenance prévue le 5 Novembre 2008, ENS Cachan, EDSP.
11. Khuyen Hoang Thi, « Etude de molécules photo et électro-commutables commutables et de nanostructures pour l'optique non linéaire », (Directeur de Thèse : Isabelle Ledoux) soutenance prévue en novembre 2008, ENS Cachan, EDSP
12. Laurent Badie « Mise au point de guides polymères amplificateurs à 1,55 μm dopés par des boîtes quantiques de chalcogénures de plomb », (Directeur de Thèse : Isabelle Ledoux) soutenance prévue en décembre 2008, ENS Cachan, EDSP.

Valorisation

Préciser les contrats de recherche, les partenariats industriels.

Nous indiquons ci-dessous la liste des contrats par catégorie, leur durées de validité, et leur budget total pour le Laboratoire.

Projets européens :

- REX PHOREMOST (04/2005 - 10/2008) ; « Nanophotonics to realise Molecular-scale Technologies » : 81300 euros
- RTN HYTEC (01/2003 - 01/2007) : « The Physics of Hybrid Organic-Inorganic Heterostructures for Photonics and Telecommunications » , 190 000 euros.
- RTN NANOCHANNEL « Molecules in Nanochannels - Synthesis, Spectroscopy, and Applications » (09/2002 - 03/2006) : 159600 euros
- RTN NANOMATCH (09/2006 - 09/2010) ‘Nanostructured organic/inorganic hybrid systems for optoelectronic devices’, 294 317 euros
- STREP NANO4DRUGS (01/2006 - 01/2009) : « Protein-Based Drug Delivery Device based on Fluorescent Diamond Nanoparticles. » 204 000 euros
- STREP EQUIND (01/2007 - 01/2010) : Engineered Quantum Information in Nanostructured Diamond » coordonné par le LPQM. 301 500 euros
- ERANET NEDQIT (06/2007 - 06/2010) : « Nano-engineered Diamond for Quantum Information Technology » : 200 000 euros

Coopérations internationales

- Réseau franco-israélien de biophotonique : "Bioimaging" (01/2006-01/2008) : 48 000 euros
- PRC/JRP CNRS France-Taiwan : « Nonlinear microscopy developments for investigations of biomolecules in micro- and nano- domains » (01/2007 – 01/2010) : 21 000 euros
- Projet Hubert Curien avec l'ENCU, Shanghai (01/2007 – 01/2009) : 14 000 euros
- PICS franco-chinois CNRS : (01/2007 – 01/2009) : 14 000 euros

ACI et ANR

- ACI « Cristaux biophotoniques » (12/2004 – 12/2007) : 82 500 euros
- ACI « Bio-optique non linéaire » (04/2005 – 04/2008) : 148 500 euros
- ANR P-Nano « Photomobiles » (01/2005 – 01/2008) : 76 950 euros
- ANR P-Nano « Prospiq » (Protocoles quantiques utilisant des sources de photon unique) (01/2007 – 01/2010), coordonnée par le LPQM: 121 160 euros
- ANR PCV « Imfovir » (02/2007-02/2010) : 83 314 euros
- ANR P-Nano « Nadia » (Nanocristaux de diamant, photoluminescence et croissance de couches de diamant ultraminces) (01/2008 – 01/2011), coordonnée par le LPQM 109 117 euros
- ANR PNANO « MICHRY » (‘Couplage cohérent d’excitons organiques et inorganiques dans une microcavité hybride’) (01/ 2007 – 01/2010), coordonnée par le LPQM : 138 472 Euros
- PNANO ANR « SCOP » (‘Strong coupling in Plasmonics’) (01/2008 – 01/2011) : 58 950 Euros
- ANR PNANO2007 « CEDONA. » « Contrôle et étude de l’influence du dopage sur les propriétés électroniques des nanotubes de carbone) (01/2008 – 01/2011) : 139 240 euros.
- ANR Blanc “COMET “ (12/2008 – 12-2011) : 80 000 euros
- ANR P-Nano « NanoCheops » (01/2009 – 01-2012) : 103 492 euros

Collectivités territoriales : C’Nano Ile-de-France

- NANOCRYPT (09/2004 – 09/2006) : 60 000 euros
- BIODAM (09/2006 – 09/2009) : 3 ans d’allocations pour une bourse de thèse (O. FAKLARIS)
- SOPRANO (09/2006 – 09/2008) : 58 000 euros
- MICRORG (Microcavités organiques émettant dans le proche UV) (11/2006 – 11/2008) : 45 000 Euros
- « Composants actifs multifonctionnels à base de polymères pour la photonique » (01/2007 – 01/2010) : 3 ans d’allocations pour une bourse de thèse (N. DJELLALI)
- EPONAD (Etude des propriétés optiques des nanotubes dopés) (09/2008 – 09/2009) : 40 000 Euros
- « Microscopie Electro-optique : un nouvel outil pour la cartographie micrométrique de champs électriques d'origines physique et biologique » (05/2008 – 05/2009) 43000 euros (financement d’un post-doc)
- MELOA (Microscopie électro-optique) (09/2006 – 09/2009) : 50 000 euros

RTRA

- Triangle de la Physique : MOSKITO (Molécules pérovskites en microcavité) : 60 000 euros
- Magnétomètre à Centres colorés du diamant « B-diamant » (chaire RTRA pour J. Wrachtrup + 170 000 euros)

Fondations :

- Contrat de recherche du Groupe Composants avec la fondation EADS pour la période septembre 2007- septembre 2009: les laboratoires impliqués sont LPQM et SATIE (100 000 euros)
- Contrat de recherche du Groupe Nanophotonique Quantique avec la fondation EADS pour la période septembre 2006- septembre 2009: (89 800 euros)

Industriels

- Contrat de recherche entre le LPQM (Groupe Nanophotonique Quantique) et EADS dans le cadre d’InnoCampus, pour l’année 2007 (15000 euros)
- Contrat de recherche du Groupe Composants avec le Laboratoire National de Métrologie et d'Essai pour la période septembre 2008- septembre 2009: les laboratoires impliqués sont LPQM et LPBA.

Brevet

- Nicolas Cerf, Rosa Tualle-Brouri, Philippe Grangier, Frédéric Grosshans, Gilles Van Assche, Jérôme Wenger, US Patent 7403623 - *High-rate quantum key distribution scheme relying on continuously phase and amplitude-modulated coherent light pulses*, délivré le 22 juillet 2008

PARTIE 3 : ENSEIGNEMENT ET FORMATION PAR LA RECHERCHE, INFORMATION ET CULTURE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE

Les membres permanents de l'unité sont majoritairement enseignants-chercheurs, et contribuent donc très fortement aux activités d'enseignements à l'ENS Cachan, au niveau licence, M1, M2 et préparation à l'agrégation de physique. Plusieurs d'entre eux sont engagés dans d'importantes responsabilités : Emmanuelle Deleporte est directrice du département de physique de l'ENS Cachan.

Isabelle Ledoux-Rak est responsable du M2 « Photonique Moléculaire pour les bio- et nanotechnologies » de l'ENS Cachan, et coordonne le Master Erasmus Mundus « Monabiphot » adossé à ce M2 (master européen sur 2 ans, avec des promotions d'environ 26 à 28 étudiants par an depuis septembre 2006).

Jean-François Roch est responsable de l'Ecole Doctorale Sciences Pratiques de l'ENS Cachan.

J.S. Lauret est chargé de l'organisation des séminaires du département de physique de l'ENS Cachan, et de la journée « science et société » de l'ENS Cachan.

Plusieurs enseignants-chercheurs du LPQM (J-F. Roch, J. Zyss) ont publié des articles dans des revues de vulgarisation scientifique et ont présenté des exposés « grand public » sur leurs thématiques de recherche.

PARTIE 4 : ACTION DE FORMATION PERMANENTE DES PERSONNELS DE L'UNITE

Bilan de formation de Chi Thanh Nguyen pour la période 2005-2008:

Année	Durée (en jours)	Intitulé de la formation	Organisme de formation	Lieu de formation
2005	8	Ecole thématique: "Physique autour de Semiconducteurs organiques"	GDR CO2 du CNRS	Aussois
2006	5	Ecole thématique: "Nanoécole"	CNRS	Autrans
2007	7	Ecole d'été Monabiphot	Erasmus Mundus	Porquerolles
2008	9	Ecole d'été Monabiphot	Erasmus Mundus	Porquerolles

Bilan des formations dispensées par les personnels de l'unité

La formation à la méthode de mesure ellipsométrique permettant la caractérisation optique des couches minces pour les étudiants et les chercheurs du LPQM et du PPSM est assurée par Chi Thanh Nguyen. Deux séances, chacune de 2 heures, ont été organisées en 2006 dans ce cadre.

PARTIE 5 : HYGIENE ET SECURITE

- *Bilan des accidents et incidents survenus dans l'unité et mesures prises.*

Le laboratoire a subi un incendie fin septembre 2005, incendie qui s'était déclenché dans la nuit, en l'absence des personnels du laboratoire, suite à une défaillance électrique d'un réfrigérateur se trouvant dans la salle réservée pour les préparations chimiques (salle 113 bis). La fumée s'est propagée dans la salle d'expérience voisine (salle 114). Grâce aux détecteurs de fumée installés dans ces deux salles, le signal d'alarme s'est mis en route immédiatement et l'arrivée à temps de sapeurs-pompiers a pu empêcher la propagation du feu aux salles voisines. Les dégâts matériels ont été limités par cette intervention, mais la plus grande partie des équipements de recherche a été détruite. En 2006, les deux salles incendiées ont été complètement refaites et un nouveau système de détection de fumée et d'alarme a été installé. Une petite partie des matériels contaminés par la fumée ont été nettoyés et récupérés pour les expériences. A cette occasion, l'ensemble des dispositifs de sécurité du laboratoire a été révisé suivant les normes en vigueur. En particulier, le laboratoire a investi pour équiper des armoires de sécurité résistantes au feu servant à stocker les produits chimiques dans la nouvelle salle refaite après l'incendie. Nous avons également fait le tri des produits chimiques dangereux pour les stocker dans la soute réservée de l'ENSC. La question de stockage temporaire avant le traitement des déchets chimiques dans la salle de préparation a également été organisée : des bidons sélectifs pour le tri des déchets liquides, des poubelles hermétiques pour la verrerie et pour des déchets imbibés de solvants ont été installés dans la salle chimique et la salle technique de salle blanche.

Nous avons eu deux visites de M. Franck Devauchelle, Ingénieur chargé de l'Hygiène et de la Sécurité (H&S) de l'ENS de Cachan en mai 2007 et en janvier 2008 pour l'inspection de l'organisation et de la mise en œuvre des mesures de sécurité et d'hygiène au laboratoire.

Le laboratoire a été aussi sélectionné par le Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche pour une visite de l'inspection par le comité de sécurité et d'hygiène du ministère le 08 février 2008. A cette occasion, le comité a passé la revue de l'ensemble dispositifs mis en œuvre au laboratoire et formulé des recommandations que nous avons mises en œuvre depuis cette visite.

- *Identification et analyse des risques spécifiques rencontrés dans l'unité.*

Les salles d'expériences du Laboratoire sont dispersées sur plusieurs étages du bâtiment relativement éloignées les unes des autres. Cette géographie rend la mise en œuvre des règlements d'hygiène et de sécurité plus difficiles pour l'ACMO sur l'ensemble du laboratoire, notamment avec le faible nombre de personnels permanents. Les deux risques majeurs au laboratoire sont des risques chimiques et lasers. Nous n'avons pas d'utilisation directe de sources de haute tension et nous n'avons pas de source radioactive.

- *Dispositions mises en œuvre en fonction des risques. Priorités retenues.*

Pour les risques chimiques nous avons mis en place des mesures de sécurité dans la salle de préparation chimique, dans la salle technique et en salle blanche, ainsi que dans les salles d'expérience du laboratoire. L'équipement en armoires sécurisées avec filtre actif et ventilation, ainsi que l'achat d'un réfrigérateur sécurisé permet de faire le tri et le stockage spécifique des produits chimiques. L'installation et la vérification des hottes de préparation chimiques ont été mises en œuvre à la suite de l'incendie. Nous avons aussi installé un rince œil et une douchette en salle chimique.

Pour les risques des lasers, outre les signalisations obligatoires pour avertir le public à l'entrée des salles d'expérience, nous avons imposé le port des lunettes adaptées pour le type de laser utilisé. Une mesure envisagée, conforme à la recommandation du comité d'inspection du ministère, est l'installation de barrières de sécurité autour des tables d'expériences pour éviter la déviation accidentelle du faisceau laser vers l'extérieur. Nous avons également installé des sonnettes à l'entrée des salles contenant des lasers pour appeler à ouvrir la porte lors d'une visite de la salle.

Nous avons également installé des armoires de pharmacie pour les secours urgents dans 2 différents endroits du laboratoire.

- *Fonctionnement des structures d'hygiène et de sécurité propres à l'unité (ACMO, comité spécial d'hygiène et de sécurité, personne compétente en radioprotection...).*

Le conseil de laboratoire fait aussi le comité d'hygiène et de sécurité du laboratoire. En début 2007, suite au départ en retraite de Rolland Hierle, Ingénieur France Telecom, ancien ACMO du laboratoire, le conseil de laboratoire a nommé Chi Thanh Nguyen, Ingénieur de Recherche au CNRS l'ACMO du laboratoire. En même année, la Directrice de l'ENS de Cachan l'a nommé correspondant de sécurité et d'hygiène du LPQM.

Le conseil de laboratoire en 2005 a mis en place un règlement intérieur du laboratoire. Un registre d'hygiène et de sécurité, édité par l'ENS de Cachan, a été installé au secrétariat pour recueillir des informations et les commentaires des membres du laboratoire sur les questions de sécurité et d'hygiène. Ce registre permet à la direction et à l'ACMO du laboratoire de suivre l'évolution de ces questions au laboratoire.

- *Dispositions mises en œuvre pour la formation des personnels et notamment des nouveaux entrants (y compris stagiaires, doctorants...)*

La secrétaire du laboratoire a régulièrement suivi des formations de secouriste. Elle est la secouriste du laboratoire. Un autre membre permanent du laboratoire va être prochainement formé afin de renforcer le dispositif de secouriste au laboratoire.

Deux formations des risques d'incendie et de manipulation des extincteurs ont été suivies par les doctorants et les permanents du laboratoire en 2006 et 2007.

Une formation des risques chimiques pour les membres du laboratoire a été organisée en 2007.

Nous avons proposé au service H&S de l'ENS de Cachan d'organiser des formations des risques laser en 2008 et en 2009 pour les laboratoires concernés du campus, mais ces formations sont encore en attente.

- *Problèmes de sécurité qui subsistent.*

Le principal problème de sécurité actuel réside dans les émanations provenant du laboratoire PPSM, deux étages en-dessous, et qui viennent parfois perturber sérieusement des conditions de travail des personnels

installés dans les salles 108 – 114 du bâtiment d'Alembert. Ces émanations sont la conséquence d'un mauvais fonctionnement des hottes dans les locaux de chimie de synthèse du PPSM. Ce laboratoire ne dispose pas des crédits nécessaires pour résoudre ce problème. Le déménagement de ce laboratoire dans des locaux rénovés du campus de Cachan est prévu au plus tôt en 2010, les membres du LPQM resteront donc exposés à ces émanations pendant plus d'un an au minimum. L'ingénieur sécurité de l'ENS Cachan a été bien sûr informé de ce problème, mais aucune solution à court terme n'est envisagée à ce jour.