

LES ACTIVITES EN «OPTIQUE»

Introduction

Ce livret comportant 20 fiches résume les activités de recherche en Optique et Photonique menées entre 2003 et 2006 au sein des quatre équipes du Département d'Optique P.M. Duffieux:

Equipe Nanométrie et Microsystèmes pour les Sciences du Vivant (NMSV) :

- OP1. Mesure de position subpixel applications aux sciences du vivant
- OP2. Microsystèmes pour la Fécondation In Vitro
- OP3. Bio-Lab on chip pour la détection de gaz ou d'odeurs : le Bio-nez
- OP4. Sonde optique pour la détection des allergènes
- OP5. Applications des continua de lumière blanche en biologie : microscopie de fluorescence et spectroscopie de temps de vol
- OP6. Spectro-tomographie optique de cohérence : développement d'une sonde optique miniaturisée pour le diagnostic des lésions cutanées en temps réel

Equipe Nano-Optique et Champ Proche (NOCP) :

- OP7. Etude de l'émission, de la détection et de l'effet de pointe (linéaire + non linéaire) obtenus avec une sonde champ proche
- OP8. Nano-émetteurs/collecteurs pour la nano-optique
- OP9. Nanostructures métalliques
- OP10. Cristaux photoniques en niobate de lithium
- OP11. Fabrication et instrumentation pour la nano-photonique

Equipe Optique Non Linéaire (ONL) :

- OP12. Imagerie non linéaire et quantique
- OP13. Solitons spatiaux et guides photo-induits
- OP14. Amplification paramétrique sur fibre optique pour les télécommunications à haut débit
- OP15. Sources laser à fibre de nouvelle génération

Equipe Optoélectronique (OPTO) :

- OP16. Composants photoniques
- OP17. Dynamiques non linéaires
- OP18. Optique ultrarapide
- OP19. Cryptage par Chaos
- OP20. Cryptage Quantique

Nous avons choisi, au niveau de FEMTO-ST, d'organiser les différents livrets de manière à permettre au lecteur de se forger une opinion sur la composition et la cohérence scientifique des futurs départements souhaités pour la période quadriennale 2008-2011 (cf. le chapitre Prospective de FEMTO-ST dans le document de synthèse). Compte tenu de ce choix, il convient de rajouter 3 fiches supplémentaires au bilan d'activités de l'Equipe Nano-Optique et Champ Proche. Ces fiches correspondent aux travaux menés en micro-optique et en microsystèmes MOEMS :

- MN3. Microcapteurs opto-mécaniques résonnants pour la métrologie in situ de Microsystèmes
- MN4. Métrologie hors plan des MEMS par interférométrie de Twyman Green
- MN5. Système de détection basée sur la réinjection optique dans une cavité VCSEL pour la microscopie à sonde locale

La poursuite de ces activités étant en cohérence et en synergie avec la charpente pluridisciplinaire du Département Micro Nano Sciences et Systèmes dont la création est proposée, ces trois fiches sont donc répertoriées au sein du livret préfigurant ce futur Département.

Enfin, dans chaque fiche, la production scientifique principale est référencée selon la liste 2002-2005 donnée dans le bilan quantitatif, ou fait état de quelques publications plus récentes ou particulièrement significatives.

OP16 – Composants photoniques (dép. Optique, OPTO)

Résumé

Objectif du projet :

Un des enjeux des télécommunications optiques haut-débits, longues distances est de générer un signal exempt de modulation de fréquence parasite (*chirp* en anglais) –ou à chirp contrôlé- au début de la chaîne de transmission. Ce critère est incompatible avec la modulation directe de l'intensité à partir de la source laser : c'est la raison pour laquelle les techniques de modulations externes sont privilégiées. Les modulateurs intégrés sur niobate de lithium sont les plus usités à l'heure actuelle pour la modulation d'intensité à haut-débit : leur maturité technologique, leur faible dépendance en longueur d'onde, et leurs faibles pertes optiques sont autant d'atouts qui justifient leur succès. Partant de notre savoir-faire important et de notre maîtrise de la technologie niobate, l'objectif a été de développer un nouveau modulateur d'intensité LiNbO_3 à chirp nul intégré sur coupe Z, en collaboration avec Photline Technologies.

Suite à ces travaux, nous avons diversifié notre activité « composants » et un second objectif porte à présent sur la réalisation de nouvelles fonctions sur des puces optiques intégrées sur niobate de lithium. Il s'agit plus spécifiquement d'introduire une microstructuration d'indice dans des guides d'onde pour réaliser des miroirs de Bragg qui jouent simultanément le rôle de réflecteurs et de filtres en longueur d'onde. Ce type de miroir est actuellement communément réalisé sur des fibres optiques dopées Germanium. Dans ce cas, l'inscription de la microstructure périodique est obtenue en mettant à profit l'effet photoréfractif induit par un rayonnement UV sur la silice dopée Ge. Au demeurant, les faibles variations d'indice dans les fibres impliquent que la longueur des miroirs de Bragg sont de plusieurs dizaines de centimètres. L'inscription directe des miroirs sur les guides d'onde Ti:LiNbO_3 vise d'une part à réduire l'encombrement en intégrant une ou plusieurs fonctions "miroir dichroïque" sur un même substrat mais aussi à rendre ces miroirs actifs en mettant à profit l'effet électro-optique du niobate de lithium.

Personnes impliquées :

R. Ferrière (DR, 50%), N. Butterlin (MC, 10%), K. Ghoumid (DOC, 100%), M. Mostefa (ATER 04-05, 50 %), N. Courjal (DOC, 100 %).

Collaborations :

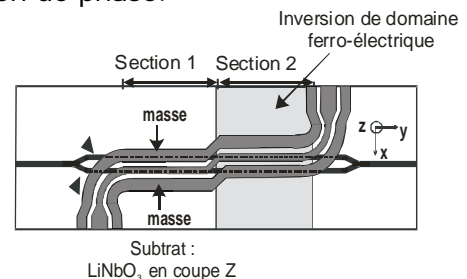
Photline Technologies Besançon, Laboratoire Aimé Cotton Orsay, Institut National des Télécommunications, Evry.

Soutiens financiers :

Photline Technologies, ACI Nanosciences LASCOH, ACI Nanosciences COBIAN

Description des travaux et résultats obtenus

La particularité du modulateur développé réside dans son paramètre de chirp, qui peut être ajusté à zéro en contrôlant la structure, à l'aide d'une seule tension de commande. Cette performance est atteinte sans sacrifice sur la tension de commande, qui est naturellement faible lorsque le modulateur est intégré sur la coupe Z du cristal. Le principe de fonctionnement de ce modulateur repose sur l'inversion de domaine ferro-électrique combinée à des électrodes à inversion de phase.



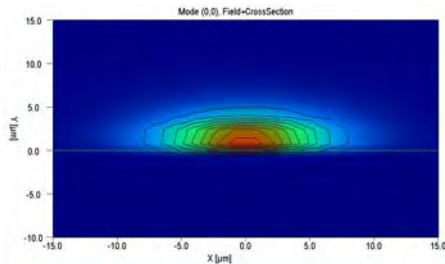
*Schéma de principe du modulateur
La structure est rendue symétrique en combinant
l'inversion de phase des électrodes et l'inversion de
domaine ferro-électrique. La symétrie obtenue permet
de réduire considérablement le chirp*

Pour ce qui concerne le second objectif, la mise en oeuvre expérimentale de miroirs de Bragg associés à des guides d'onde obtenus par diffusion de titane dans le niobate de lithium a nécessité de développer des modélisations physiques, afin de simuler les phases expérimentales et limiter au maximum les essais systématiques très coûteux en argent et en temps.

- La première modélisation simule le phénomène de diffusion de titane pour évaluer le profil bidimensionnel d'indice du guide d'onde. Un maximum de paramètres

expérimentaux (coupe du cristal, direction de propagation, dimensions des rubans de titane, température et durée de diffusion ...) ont été pris en compte pour approcher au plus près les conditions expérimentales.

– La seconde modélisation calcule la cartographie du champ électrique de l'onde lumineuse guidée en fonction des profils d'indice modélisés, afin de déterminer les conditions de confinement maximum du champ électrique à proximité de la surface du guide. L'objectif est d'accorder ce guide avec les méthodes de structuration périodique nécessaires à l'apparition de l'effet Bragg.

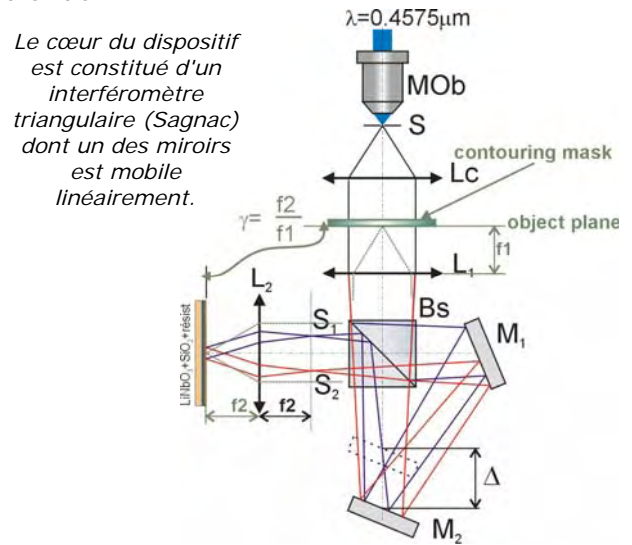


Cartographie 2D du champ lumineux dans le guide d'onde coupe X, propagation Y en mode TE, $\lambda=1.55\mu\text{m}$

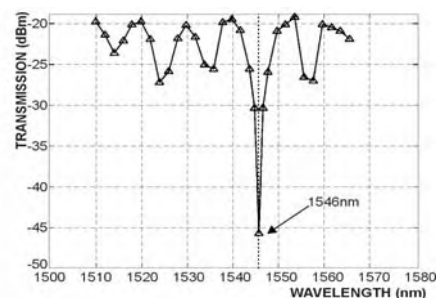
- La troisième modélisation simule la propagation de l'onde guidée à travers une perturbation périodique d'indice effectuée le long de la direction de propagation. Les modélisations basées sur la méthode "matricielle" et sur la méthode "des modes couplés" prennent en compte les différentes techniques permettant de modifier l'indice (échange protonique localisé, variations périodiques de l'épaisseur du guide, dépôt à la surface du guide d'un matériau d'indice fort structuré en réseau). Elles permettent également d'évaluer l'influence des paramètres géométriques (pas du réseau, rapport cyclique, ordre d'interférence...) du réseau perturbateur sur le profil de la fonction de réflexion et la largeur de la bande passante.

D'un point de vue expérimental, la réalisation de réseaux de très faible pas $<1.5\mu\text{m}$ et comportant un grand nombre de traits (3000) a nécessité la réalisation d'un dispositif holographique original. Ce système est basé sur un interféromètre triangulaire à différence de marche rigoureusement nulle, ce qui lui confère une grande invulnérabilité aux vibrations. Il permet d'inscrire le motif périodique sur une couche de résine photosensible déposée sur le substrat de niobate pour former un masque "on-chip" qui est ensuite utilisé pour réaliser la

microstructuration de l'indice effectif du guide d'onde.



Différentes techniques sont mises au point pour effectuer cette opération et font actuellement l'objet d'une étude comparative. La première réalise un échange protonique dans un bain d'acide benzoïque de manière à modifier localement l'indice du guide. La seconde est basée sur le dépôt à la surface du guide d'une couche mince ($0,8\mu\text{m}$) de Ta_2O_5 , d'indice 2, structurée sous forme de réseau par méthode holographique et usiné par RIE. La modification périodique de l'indice de ce superstrat se traduit par une variation de l'indice effectif du guide. La troisième méthode consiste à graver directement le niobate de lithium à travers le masque holographique, par RIE, pour faire varier l'épaisseur physique du guide.



Variation en fonction de la longueur d'onde du pouvoir réflecteur d'un miroir de Bragg inscrit dans un guide monomode Ti:LiNbO₃

Conclusion et perspectives

Les modulateurs développés sont maintenant commercialisés par Photline Technologies. Les perspectives s'inscrivent vers la réalisation de modulateurs à zones multiples, dont on peut contrôler la dispersion en fréquence du chirp.

Pour la réalisation des réseaux de Bragg, la validation des modèles par l'expérience a permis de beaucoup progresser au niveau de la compréhension des phénomènes et surtout de maîtriser l'ensemble des paramètres expérimentaux. Des réseaux de Bragg de périodes courtes (ordre 5) ou très longues (ordre 20) ont permis d'obtenir des pouvoirs de réflexion de l'ordre de 90% avec des bandes passantes comprises entre 5 nm et 0,8 nm (voir figure précédente). Un interféromètre de Fabry-Pérot intégré et accordable est en cours de développement

Production scientifique

7 publications dans des revues à comité de lecture (O55, O56, O119, O133, O139, O141, O146), 9 actes de congrès, dont : O247, O292, O293, O332, O340.

Publication récente :

"Bragg mirrors inscription on LiNbO_3 waveguides by index microstructuration", Richard Ferrière, Badr-Eddine Benkelfat, John M. Dudley, Kamal Ghomid, Applied Optics Vol 45 (2006) pp 3553-3560

1 brevet (CNRS/Photline) :

H. Porte, J. Hauden, P. Mollier, « Dispositif et procédé de détermination du "CHIRP" d'un modulateur électro-optique du type MACH-ZEHNDER », Brevet français n° FR64697N, déposé le 29/04/2002. N. Courjal, H. Porte, J. Hauden, P. Mollier, Extension internationale n° WO03093777 A2 (Photline) publiée le 28/04/2003 sous le titre « Device and method for determining chirp of a Mach-Zehnder type electro-optical modulator ».

1 brevet (Groupe des Ecoles des Télécommunications) :

B. E. Benkelfat, R. Ferrière, B. Wacogne, « Procédé de fabrication d'un dispositif d'insertion ou d'extraction optique comportant un réseau de Bragg réalisé par échange photonique sur un guide d'onde en matériau électro-optique », Brevet français n° FR 02 11645 déposé le 20/09/2002. Extension internationale n° WO2004027473 publiée le 22/09/2003 sous le titre "Method of producing an optical insertion or extraction device comprising a Bragg grating which is formed by performing a proton exchange on a waveguide which is made from an electrooptical material".

1 brevet (Université Franche-Comté) :

R. Ferrière, N. Butterlin, « Télémétrie modulée à basse fréquence », Brevet français n° FR2869113 déposé le 19/04/2004. Extension internationale n° WO 2005/101056 publiée le 19/04/2005 sous le titre « Telemetry with low frequency modulation »

OP17 – Dynamiques non linéaires (dép. Optique, OPTO)

Résumé

Objectif du projet :

Ce thème de recherche traite des phénomènes dynamiques non linéaires optoélectroniques et optiques avec une approche à dominante fondamentale. Ce travail fournit un apport important pour nos activités plus appliquées dans les domaines de la sécurisation de l'information et de l'optique ultrarapide.

Dans le domaine de la sécurisation de l'information, nos études fondamentales en dynamiques non linéaires se sont concentrées sur la classe des équations différentielles à retard, qui décrivent le comportement des systèmes physiques choisis pour réaliser notre premier démonstrateur de cryptographie par chaos optique. L'étude de ce type très particulier de système dynamique nous a permis de nous positionner au niveau international, à la fois sur le plan expérimental (réalisation de démonstrateurs) et théorique, pour l'exploration de ces dynamiques originales. Des résultats fondamentaux de premier plan ont pu être obtenus et nous avons réussi à nous insérer dans un réseau de recherche européen et mondial.

Dans le domaine de l'optique ultrarapide, les efforts se sont principalement portés sur l'étude de la propagation autosimilaire en présence de gain dans les fibres optiques et les amplificateurs fibrés. La propagation autosimilaire se manifeste par une évolution asymptotique, sans distorsion, des caractéristiques temporelles et spectrales d'une impulsion ultra-brève, de profil temporel parabolique en l'occurrence. D'un point de vue fondamental, ce thème de recherche est important pour la modélisation et la validation de modèles théoriques employant la notion d'asymptoticité en régime non linéaire. Les applications découlant de ces aspects fondamentaux concernent notamment la mise au point de nouveaux types de sources et d'amplificateurs tout fibrés ultrarapides.

Personnes impliquées :

L. Larger (PR, 20%), J. Dudley (PR, 40%), P. Lacourt (MC 20 %), S. Poinot (Post-Doc 30%), R. Bendoula (Post-Doc 30%), V.

Udaltsov (Pr. Inv. 60%), H. Tavernier (DOC 30%) N. Gastaud (DOC 20%), A. Pallavisini (DOC 20%), X. Bavard (DOC 20%), E. Genin (DOC 40%), A. Locquet (DOC 70%), B. Kibler (DOC, 50%), C. Billet (DOC, 50 %), M. Lee (DOC, 50 %).

Collaborations :

Universités de Bruxelles (ULB), Palma, Athènes, Auckland Nouvelle-Zélande, Pavie, Wales, Institut d'Optique Vavilov Saint-Pétersbourg, TU Darmstadt, INSA Toulouse, XLIM Limoges, LAAS Toulouse, ENSSAT Lannion, Université de Bourgogne (Equipe Projet Multi-Laboratoires STIC-CNRS), Georgia Institute of Technology, NIST.

Soutiens financiers :

CNRS, ACI Photonique, STREP Européen FET-IST OCCULT, ACI-SI Transchaos, RNRT ACSCOM, ANR Blanc O²E (obtenu en 2006), STREP Européen PICASSO (obtenu en 2006), Institut Universitaire de France

Description des travaux

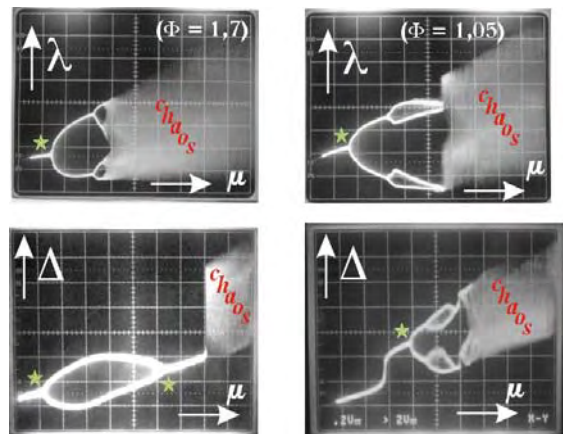
Nos études des dynamiques non linéaires des systèmes optoélectroniques chaotiques se sont basées sur nos observations expérimentales où nous avons d'abord effectué une analyse exhaustive des comportements possibles en fonction des différents paramètres (gain de l'oscillateur, valeur du retard, profil de la non linéarité, type de processus dynamique). Au travers de diverses collaborations, nous avons identifié certains verrous scientifiques, que nous avons cherché à étudier grâce à nos possibilités d'investigation expérimentale. Nous avons ainsi identifié des mécanismes dynamiques responsables de comportements particuliers (comportements hyper-chaotiques et dimensions d'attracteurs, transitions temps discret/ temps continu) en cherchant à les relier aux caractéristiques déterministes de nos systèmes, et en essayant ensuite de contrôler ces comportements, par exemple pour aboutir à la synchronisation entre chaos, nécessaire pour notre application de cryptage par chaos.

Nos travaux sur l'autosimilarité et les effets d'échelle dans les fibres optiques ont porté aussi bien sur les systèmes employant des fibres dopées erbium que sur ceux exploitant l'effet Raman. En particulier, notre étude des systèmes à gain Raman, dans le cadre d'un projet « Equipe Projet Multi-Laboratoires

CNRS» avec l'Université de Bourgogne, nous a permis d'être les premiers à publier une preuve de l'existence de similaritons générés par gain Raman. En parallèle, les travaux réalisés à Besançon sur les systèmes à fibre dopée erbium se sont portés sur les aspects plus fondamentaux de l'évolution et la mise en forme progressive d'impulsions arbitraires injectées dans la fibre vers le profil asymptotique prédit par la théorie.

Résultats obtenus

L'étude exhaustive des diagrammes de bifurcations de nos systèmes optoélectroniques expérimentaux nous a permis de faire l'inventaire de toute une panoplie de routes possibles vers le chaos pour cette classe particulière de systèmes dynamiques.

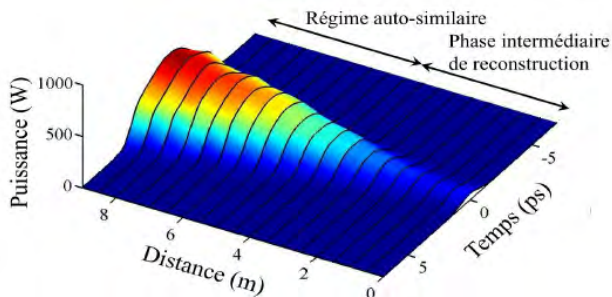


Diagrammes de bifurcation expérimentaux obtenus en changeant certains paramètres modifiant le déterminisme.

En collaboration avec un mathématicien de l'ULB (T. Erneux), nous avons décrit théoriquement et démontré expérimentalement les conditions dans lesquelles il est possible d'observer une bifurcation de Hopf sous-critique, pour laquelle un cycle instable apparaît au voisinage d'un point fixe instable lorsque ce dernier subit un gain de stabilité. L'expérience a été conduite en maîtrisant précisément le profil local de la transformation non linéaire intervenant dans la dynamique.

Nos résultats expérimentaux sur la propagation autosimilaire nous ont permis de démontrer explicitement le caractère autosimilaire des impulsions paraboliques en utilisant une technique de type « cut-back ». Du point de vue des applications innovantes

résultant de ces recherches, nous avons pu réaliser la compression de ces impulsions en dessous de 200fs et accroître leur puissance crête à environ 5 kW. La particularité ici réside dans la pureté de la compression, présentant un piédestal très atténué par rapport aux techniques concurrentes.



Evolution auto-similaire d'une impulsion injectée dans un amplificateur erbium (résultats expérimentaux)

Conclusion et perspectives

En plus des activités décrites ci-dessus, d'autres activités transverses au sein de FEMTO-ST, dans l'axe « Temps-Fréquence et Télécommunications », sont récemment venues enrichir ce volet fondamental des dynamiques non linéaires en optique et optoélectronique. Elles portent sur l'étude des oscillateurs optoélectroniques à très haute pureté spectrale. Les dynamiques non linéaires sont par ailleurs identifiées comme un des domaines scientifiques "clé" du siècle à venir, de par son potentiel en termes de découvertes et en termes de révolutions scientifiques et technologiques, non seulement en physique, mais aussi en économie, biologie, sciences du vivant.

Production scientifique

16 publications dans des revues à comité de lecture (O27, O32, O33, O63, O66, O67, O78, O84, O88, O112, O151, O155, O158, O159, O163, O167), 2 conférences invitées (O177, O183), 18 actes de congrès, 3 autres conférences, 1 chapitre d'ouvrage (O522) dont : O225, O244, O250, O300, O357.

Publication significative :

L. Larger, P.A. Lacourt, S. Poinot, M. Hanna, "From flow to map in experimental high dimensional electro-optic nonlinear delay oscillator", **Physical Review Letters**, Vol.95, p.043903 (2005)

OP18 – Optique ultrarapide (dép. Optique, OPTO)

Résumé

Objectif du projet :

Ce thème de recherche concerne divers aspects de l'interaction lumière-matière en régime ultrarapide, avec un intérêt particulier pour les applications aux longueurs d'onde des télécommunications (1550 nm). Nous nous concentrons plus spécialement sur le développement de nouvelles techniques de mesure des phénomènes ultrarapides et des effets de propagation non linéaire dans les fibres optiques, notamment ceux à l'origine de la génération de supercontinuum en régime ultra-bref. Les dynamiques autosimilaires, décrites dans la fiche précédente, sont également reliées à cette activité en optique ultrarapide.

Personnes impliquées :

John Dudley (PR, 60%), Pierre-Ambroise Lacourt (MC, 60%), Laurent Larger (PR, 10%), Richard Ferrière (DR, 10%), M. Hanna (CR, 90%) Cyril Billet (DOC, 50%), Bertrand Kibler (DOC, 50%), J. Vasseur (DOC, 100%), D. Boivin (DOC, 100%), Laurent Provino (DOC, 25%)

Collaborations :

Université de Bath (Angleterre), Fujikura (Japon), Université d'Auckland (Nouvelle-Zélande), Université de Bonn (Allemagne), Georgia Institute of Technology, NIST (Etats-Unis).

Soutiens financiers :

CNRS, ACI Photonique, projet européen INTAS, Institut Universitaire de France

Description des travaux

Le principal objectif de nos travaux sur la caractérisation d'impulsions brèves concerne le développement des méthodes dites FROG, ou autocorrélation résolue en fréquence, adaptées aux sources communément rencontrées dans le domaine des télécommunications. Ces sources ont l'avantage d'être compactes et bon marché, mais elles délivrent des impulsions de quelques milliwatts de puissance crête, ce qui rend leur caractérisation impossible par les techniques de diagnostics classiques (basées sur la génération de second harmonique).

Nous avons donc développé de nouvelles méthodes basées sur l'interaction non linéaire de mélange à quatre ondes dans des fibres optiques et des amplificateurs à semiconducteur, afin d'augmenter d'une manière significative la sensibilité de la méthode FROG.

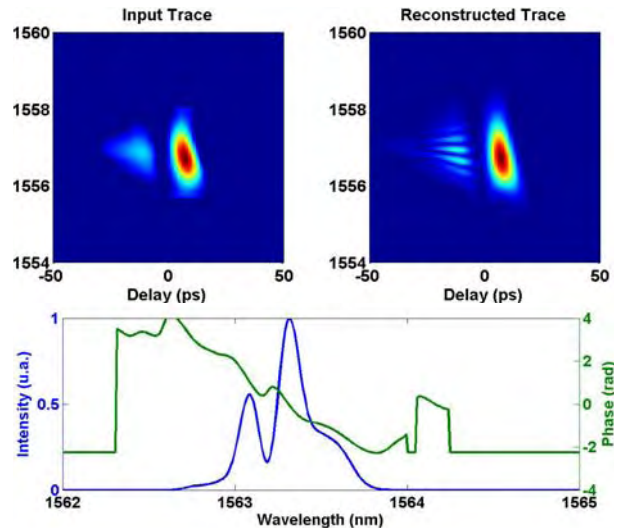
Cette technique a ensuite été employée dans un certain nombre d'expériences de propagation dans les fibres, notamment pour l'étude de l'évolution du chirp lors de la propagation d'impulsions à 10GHz sur des distances importantes grâce à une boucle à recirculation, ou pour le développement d'une source innovante produisant des impulsions successives de longueurs d'onde différentes. Cette source a pour but une application au multiplexage hybride temps-longueur d'onde. La compression non linéaire en régime pré-soliton a aussi été étudiée grâce à cette méthode, de même que l'effet de compression par lentille temporelle.

Nos recherches sur la propagation en régime ultrarapide impliquent une approche aussi bien expérimentale que numérique. Plus précisément, nous avons développé un outil de simulation numérique très puissant qui permet de modéliser la propagation d'impulsions brèves en régime fortement non linéaire dans des fibres à cristal photonique, suffisamment précis pour prendre en compte des effets normalement inaccessibles dans le régime de l'enveloppe lentement variable. De plus, cette approche a été perfectionnée pour tenir compte des limitations tant techniques que physiques – notamment quantiques – des systèmes expérimentaux. Cet outil représente de fait une capacité unique de simulation, notamment de la génération de supercontinuum spectral. Ce travail a été complété par une approche expérimentale tant à Besançon que dans le contexte de collaborations internationales avec des laboratoires phares dans le domaine de la métrologie d'impulsions (Georgia Tech) ou de la mesure de bruit (NIST).

Résultats obtenus

Dans le domaine de la caractérisation d'impulsions brèves, les résultats obtenus ont permis la mesure complète – intensité et phase – d'impulsions générées par un laser à fibre bloqué en phase par modulation harmonique active. Ces impulsions de durée 2,5 ps couvraient toute la bande C des

télécommunications optiques, avec une puissance moyenne de seulement 1 mW ; leur caractérisation témoigne d'une amélioration de sensibilité d'un ordre de grandeur par rapport aux techniques précédentes.



Trace d'autocorrélation en fréquence expérimentale et profil d'impulsion correspondant

La modélisation de la génération de supercontinuum spectral a donné lieu à de nombreux résultats marquants. Par exemple, nous avons pu précisément modéliser l'évolution spectrale et temporelle lors de la propagation d'impulsions brèves dans une fibre photonique, évaluer les propriétés caractéristiques de cohérence et de bruit des supercontinuum en régime femtoseconde, et publier le meilleur accord à ce jour entre modèle numérique et mesures expérimentales. Notre pratique des techniques de mesure comme le FROG nous a également permis de travailler en lien étroit avec plusieurs groupes expérimentateurs, pour analyser les spectrogrammes obtenus expérimentalement.

Conclusion et perspectives

Ces résultats ont permis à notre groupe d'obtenir une notoriété internationale dans le domaine de l'optique ultrarapide, ce qui se traduit par de nombreuses invitations à des conférences ou séminaires tant en France qu'à l'étranger.

Dans le futur, nous continuerons à explorer les développements de nouvelles techniques de mesures, et plus particulièrement celles permettant d'accéder à la dynamique de

propagation non linéaire dans les guides nanostructurés. L'étude des effets de propagation dans les fibres fortement non linéaires explorera de nouveaux phénomènes dans le cas où l'impulsion est aussi courte qu'un seul cycle optique. Les études préliminaires laissent penser que les propriétés uniques des fibres photoniques pourraient permettre l'apparition d'effets dynamiques à l'échelle de l'attoseconde, qui seraient alors observables à partir de sources lasers compactes et de faible énergie. Par ailleurs, un nouvel axe se développe en ce moment dans le contexte de FEMTO-ST, qui concerne l'étude des phénomènes d'interaction rayonnement-matière appliqué à l'usinage femtoseconde de matériaux photoniques. Ces recherches se trouvent à l'intersection de plusieurs domaines d'expertise de FEMTO-ST (optique ultrarapide et non linéaire, micro- et nano-technologies, micro-fabrication) dans le contexte industriel aussi bien national que local (sous la forme de partenariats industriels).

Production scientifique

25 publications dans des revues à comité de lecture (O5, O14, O23, O26, O31, O46, O47, O52, O60, O72, O73, O99, O100, O107, O109, O110, O116, O128, O142, O143, O144, O145, O152, O153, O164), 5 conférences invitées (O181, O185, O186, O194, O195), 17 actes de congrès, 1 autre conférence, dont : O235, O243, O260, O261, O279, O280, O297, O302, O308, O352, O362.

Une partie de ce travail a été sélectionnée par l'Optical Society of America comme **fait marquant 2003 dans le domaine de l'optique ultrarapide** : *Optics in 2003*, *Optics and Photonics News* 14:12, 44 (2003)

A noter également que la reconnaissance de ces travaux a donné lieu très récemment à la rédaction d'un **article invité pour Review of Modern Physics** : J. M. Dudley, G. Genty, S. Coen, "Supercontinuum Generation in Photonic Crystal Fiber," *Reviews of Modern Physics*, Vol 78 1135-1184 (2006)

OP19 – Cryptage par chaos (dép. Optique, OPTO)

Résumé

Objectif du projet :

Les problèmes de sécurité de transmission augmentent en même temps que la capacité des réseaux. Selon la confidentialité des données et selon les contraintes de transmission en termes de vitesse, les techniques cryptographiques actuelles, basées sur des algorithmes de codage, sont nécessairement limitées à cause du temps de calcul nécessaire pour le codage et le décodage. Cette thématique s'inscrit dans une nouvelle approche cryptographique, complémentaire des méthodes algorithmiques, et intervenant directement au niveau de la couche physique des réseaux de transmission (optiques dans notre cas). Elle propose de coder directement le signal optique binaire en le masquant dans une porteuse chaotique très large bande, rendant ainsi possible l'opération de sécurisation en temps réel, à des débits au delà du Gb/s.

La sécurisation par porteuse chaotique est née au début des années 90, comme une application d'une découverte issue de la physique fondamentale des dynamiques non linéaires, à savoir la possibilité de synchronisation des comportements chaotiques. La synchronisation étant une propriété clé dans presque tout système de transmission, l'utilisation des signaux chaotiques pour les transmissions est donc apparue assez naturellement. Ensuite, à l'image des communications CDMA par étalement de spectre, la propriété de sécurisation a été suggérée en vertu de l'étalement spectral et du caractère pseudo-aléatoire des signaux chaotiques. La confidentialité, quoique encore difficile à évaluer, s'est vite révélée conditionnelle au degré de complexité du chaos utilisé (déchiffrement réussi des premiers systèmes de codage par chaos de faible dimension, i.e. environ 3 à 4). D'autre part, compte tenu du fort degré de maturité de la cryptographie algorithmique et de ses bonnes performances en termes de sécurité, l'intérêt effectif de la cryptographie par chaos au niveau physique s'est rapidement centré autour du débit potentiel qui pouvait être atteint. La performance en vitesse de codage est donc apparue comme un des premiers verrous scientifiques à lever pour permettre à ce domaine de continuer son évolution.

Personnes impliquées :

L. Larger (EC, Délégation CNRS 03-05, 50%), J.-M. Merolla (CH, 15%), M. Hanna (CH, 10%), P. Lacourt (post-doc 03-05 20%, EC 05-06 10%), S. Poinsot (postdoc 03-05, 70%), V. Udaltsov (Pr.Inv. 03-06 ~10mois, 40%), N. Gastaud (DOC, 80%), A. Pallavisini (DOC, 80%), X. Bavard (DOC, 80%), E. Genin (DOC, 60%), A. Locquet (DOC, 30%), M. Lee (DOC, 50 %), P. Levy (DOC, 100 %), J.B. Cuenot (DOC, 100 %).

Collaborations :

Univ. Palma, TU Darmstadt, Univ. Athènes, Univ. Pavie, Univ. Wales, Institut d'Optique Vavilov Saint-Petersbourg, INSA Toulouse, XLIM Limoges

Soutiens financiers :

CNRS, STREP Européen FET-IST OCCULT, ACI-SI Transchaos, RNRT ACSCOM, STREP Européen PICASSO (obtenu en 2006)

Description des travaux

Les travaux au département d'Optique, initiés dans ce domaine en 1994, se sont rapidement orientés vers une architecture de générateur de chaos dite non linéaire à retard, pour des raisons fortes liées à la complexité des régimes chaotiques pour cette classe originale de dynamique non linéaire. Après la démonstration réussie en 1996 (chaos en longueur d'onde) de la possibilité de synchronisation et du codage/décodage à l'aide de ces dynamiques hyper-chaotiques (dimension d'attracteur chaotique > 100), l'objectif principal a donc été d'atteindre des débits élevés (but du projet européen OCCULT, débuté en 01). Afin de réussir ce challenge, nous nous sommes orientés vers une mise en oeuvre électro-optique de notre architecture non linéaire à retard en utilisant des composants optoélectroniques typiques des télécoms optiques à très haut débit pour générer, contrôler et synchroniser des chaos en intensité. A noter que notre choix était unique puisque tous les systèmes concurrents étaient presque exclusivement basés sur des dynamiques tout-optiques de diodes laser soumises à une contre-réaction. Autour de cet objectif central du projet OCCULT (collaboration Universités de Palma, Athènes, Darmstadt, Pavie, Bangor), l'équipe a bien sûr aussi travaillé sur de nouvelles approches expérimentales des générateurs de chaos ultrarapide, en travaillant par exemple plutôt avec la phase optique ou

encore en cherchant à développer une méthode de génération de chaos compatible avec le format impulsionnel et par paquet des communications optiques en réseau (chaos en temps discret, projet Transchaos). Nous avons également exploré la transposition du procédé aux communications radiofréquences, ou encore à une génération hybride numérique/analogique. La cryptanalyse et l'étude de la confidentialité ont été également bien avancées grâce à notre collaboration avec Saint-Petersbourg.

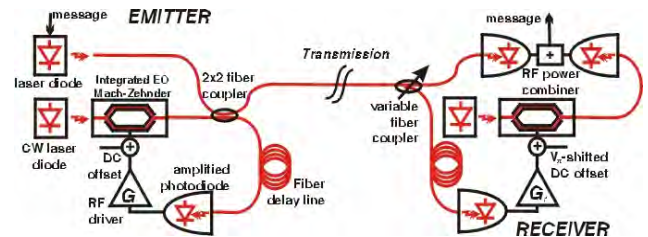


Schéma du codage / décodage par chaos électro-optique (émetteur et récepteur).

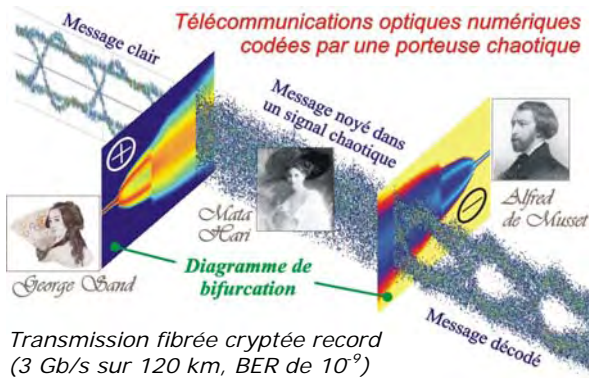
Résultats obtenus

Le projet OCCULT, montré en exemple par l'Union Européenne (collaborations intra-européennes, résultats scientifiques, valorisation académique) a effectivement débouché sur plusieurs résultats clés au niveau international.



Récepteur/décodeur par chaos multi-GHz.

L'apport de notre équipe dans ces résultats a été sans doute un des plus importants : records de débit, 3Gb/s, et de qualité, BER de 10^{-9} , soit une amélioration de plus de 6 ordres de grandeur par rapport à l'état de l'art, obtenus entre autre grâce à notre architecture électro-optique originale et unique ; nous avons ensuite obtenu un record de transmission, sur 120km de fibre, avec nos partenaires d'Athènes (lettre dans *Nature* en 2005).



Conclusion et perspectives

L'équipe est partie prenante dans un nouveau projet européen (PICASSO) qui a été accepté, ainsi qu'un projet RNRT (ACSCOM), ce qui montre la forte actualité de la thématique. L'orientation des recherches concerne d'une part le développement de composants dédiés pour aller progressivement vers des systèmes opérationnels et efficaces, et d'autre part l'exploration de l'adaptation de la méthode aux transmissions optiques en temps discret (format RZ, chaos en intensité et/ou en phase, d'impulsions optiques). Les aspects liés à la mesure de la confidentialité seront bien évidemment poursuivis. Une collaboration locale avec une équipe d'algorithmique (équipe AND, Lab. Informatique de l'Université de Franche-Comté) est également en cours de mise en place.

Production scientifique

12 publications dans des revues à comité de lecture (O1, O28, O34, O43, O69, O71, O79, O85, O86, O122, O130, O148), 6 conférences invitées (O176, O178, O179, O190, O191, O192), 9 actes de congrès, 6 autres conférences, dont : O227, O232, O264, O313.

A noter 2 publications dans **Physical Review Letters** ainsi que l'article du consortium OCCULT paru dans **Nature** : A. Argyris, D. Syvridis, L. Larger, V. Annovazzi-Lodi, P. Colet, I. Fischer, J. Garcia-Ojalvo, C. R. Mirasso, L. Pesquera, K. A. Shore, "Chaos-based communications at high bit rates using commercial fiber-optic links", *Nature*, Vol. 437, pp.343-346 (November 2005).

OP20 – Cryptage quantique (dép. Optique, OPTO)

Résumé

Objectif du projet :

Ces recherches s'inscrivent dans le domaine de la sécurisation de l'information dans les réseaux de télécommunication optiques par le biais de nouvelles méthodes de codage par optique quantique. Le développement important des télécommunications par voie optique (transmission de données, commerce électronique, explosion d'Internet, etc.) s'est accompagné d'une forte demande en matière de protection de l'information. Si l'utilisation de clés secrètes (code DES) pour le chiffrement des données transmises s'avère une méthode très répandue, elle nécessite la distribution entre les différents correspondants des clés secrètes utilisées. Les méthodes classiques de distribution de clés utilisant des algorithmes mathématiques présentent certaines failles qui ne permettent pas d'assurer au niveau théorique l'invulnérabilité des clés transmises.

La distribution quantique de clés (cryptage quantique) permet d'assurer en théorie la confidentialité absolue des clés transmises car le niveau de confidentialité est garanti par un principe physique : le principe d'incertitude d'Heisenberg. Les premières méthodes étudiées dans un certain nombre de laboratoires dont Los Alamos National Laboratory (USA), les Laboratoires de Malvern et de British Telecom (GB) et l'Université de Genève (CH) proposaient, pour coder les bits d'information, l'utilisation de la polarisation des photons ou de la phase relative entre deux photons séparés temporellement. Au niveau national, nous avons été précurseurs en 1999 pour mettre en œuvre ces principes dans des architectures télécoms. Nos objectifs, sur cette première période, visaient :

- d'une part l'acquisition des compétences nécessaires afin de suivre l'évolution de ce domaine sensible lié aux problèmes de sécurité,

- d'autre part à développer une méthode originale permettant de repousser les limites rencontrées par les équipes de recherches internationales, au niveau stabilité et durée de transmission, et ainsi s'imposer comme un acteur reconnu sur le plan international en étant à l'origine de plusieurs premières.

Personnes impliquées :

Jean-Marc Merolla (CH, 85 %), Frédéric Patois (DOC, 100%), Olivier Guerreau (DOC, 100%), Johann Cussey (DOC, 100%), Matthieu Bloch (DOC, 100%), Stéphane Donnet (DOC, 100%), Alexandre Soujaeff (DOC, 100 %).

Collaborations :

ITT Madras (Inde), Georgia Institute of Technology (USA), Société SmartQuantum, Lannion

Soutiens financiers :

CNRS, Contrat France Telecom, ACI Photonique, Contrat de collaboration de recherche avec la Société SmartQuantum S.A, Contrat de collaboration France-Inde CEFIPRA

Description des travaux et résultats obtenus

Afin d'atteindre ces objectifs, la proposition et la mise en œuvre d'un procédé de distribution à longue distance de clés par modulation à bande latérale unique (BLU) a été proposé. Les travaux effectués s'articulent suivant les trois points suivants :

- *B.1 Méthode de synchronisation longue distance* : la technique de codage s'appuie sur un principe d'interférence à un photon dans le domaine spectral entre bandes latérales de modulation générées à l'émetteur et au récepteur. Il est nécessaire que les signaux électriques générant les bandes de modulation soient synchronisés en phase et que l'on puisse corriger les fluctuations de phases induites par la propagation du signal optique. Afin de s'affranchir de cette difficulté, une nouvelle architecture permettant l'utilisation d'un signal de longueur d'onde différente se propageant simultanément avec le signal quantique a été proposé (figure 1).

- *B. 2 Mise en œuvre d'une nouvelle technique de codage permettant de s'affranchir des imperfections des sources utilisées* : l'imperfection de ces sources, c'est-à-dire leur incapacité à générer véritablement un seul photon à la fois, représente une faille au niveau de la confidentialité des clés transmises. Ainsi, la distance réelle pour laquelle la confidentialité est assurée ne dépasse pas une dizaine de kilomètre. L'utilisation, à la réception, de la

référence liée au codage BLU (figure 2, haut) interdit à l'espion toute écoute passive même lorsque les bandes latérales contiennent plus d'un photon. En effet, le correspondant légitime s'attend à détecter continuellement le signal de référence, ce qui oblige l'espion à renvoyer un signal de référence quelque soit le résultat de sa mesure. Si la mesure est erronée, il provoquera des erreurs qui permettront sa détection.

- *B. 3 Transmission quantique de clés de cryptage en milieu aérien par modulation directe* : une architecture du système adaptée aux transmissions aériennes a été mise en place en s'inspirant des travaux précédemment menés au sein du laboratoire. Le codage est réalisé par l'introduction d'un déphasage relatif entre les signaux modulant l'émetteur et le récepteur.

Une des originalités du dispositif est de tirer avantage du couplage amplitude-phase dans les lasers à semi-conducteurs en modulant directement la diode en émission permettant une intégration importante du système.

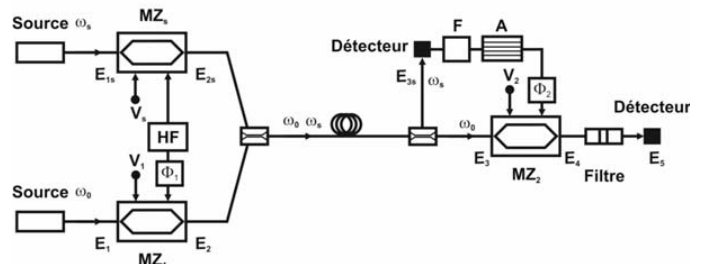


Fig.1 : Système de transmission longue distance.

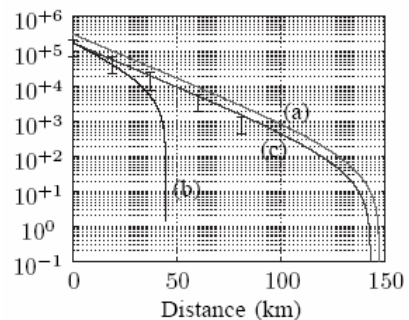
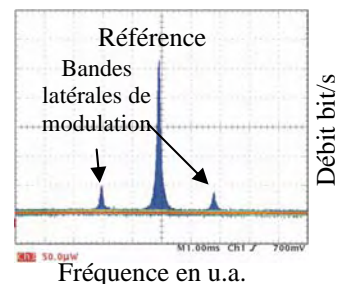


Figure 2 : (haut) Spectre du signal optique transmis (bas) Débit (bit/s) pour :
 a) protocole BB84 et source à photon unique,
 b) protocole BB84 sans référence et source laser,
 c) protocole BB84 avec référence et source laser.

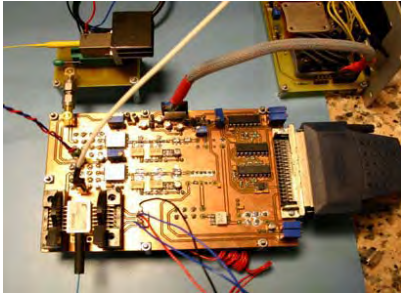


Figure 3 : Circuit intégré de l'émetteur du système de transmission de clés en milieu aérien

Conclusion et perspectives

Les différentes architectures étudiées ont permis la démonstration de la faisabilité de la méthode sur des distances pouvant atteindre plus de 100 km. Les activités de recherche s'orientent vers l'utilisation de ce principe dans le cadre du chiffrement et de l'information quantique.

Production scientifique

3 publications dans des revues à comité de lecture (O20, O117, O157), 2 conférences invitées (O188, O189), 12 actes de congrès, 1 autre conférence, dont : O210, O240, O255, O256, O317, O319, O356

Publications récentes :

- S. Donnet, A. Thangaraj, M. Bloch, J. Cussey, J.M. Merolla, L. Larger, *"Security of Y-00 under heterodyne measurement and fast correlation attack"*, Physics Letters A, 356, pp. 406-410, 2006.
- M. Bloch and S. W. McLaughlin, J.M. Merolla, F. Patois, *"Frequency-Coded Quantum Key Distribution"*, Optics Letters, accepté 2006.

1 Brevet (France Telecom) :

J.-M. Merolla, L. Duraffourg, J.-P. Goedgebuer. *"System for secure optical transmission of binary code"*, Extension internationale PCT/FR01/03920 publiée le 20/06/2002 sous le n°WO02/04267A1.

2 Brevets (SmartQuantum) en cours :

- J.M. Merolla, F. Patois, N. Pelloquin, J. Cussey, « *Système de transmission optique et dispositif de réception d'un signal optique* », n°05.08.013, déposé le 27/07/2005.
- M. Bloch, J.M. Merolla, *"Système et procédé pour la transmission sécurisée de code binaire par codage en phase et en intensité"*, n°06/08400, déposé le 25/09/2006.