



Lasers à impulsions ultra-brèves pompés par diode

Frédéric Druon

► To cite this version:

Frédéric Druon. Lasers à impulsions ultra-brèves pompés par diode. Physique Atomique [physics.atom-ph]. Université Paris Sud - Paris XI, 2008. tel-00504702

HAL Id: tel-00504702

<https://theses.hal.science/tel-00504702>

Submitted on 21 Jul 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Lasers à impulsions ultra-brèves pompés par diode

Habilitation à Diriger des Recherches

Frédéric Druon

INTRODUCTION GENERALE **5**

- | | | |
|----|-----------------------|---|
| 1. | CONTEXTE SCIENTIFIQUE | 5 |
| 2. | PRESENTATION GENERALE | 6 |

SOURCES FEMTOSECONDE **7**

- | | | |
|----|--|----|
| 1. | INTRODUCTION | 7 |
| 2. | CADRE D'ETUDE ET COLLABORATIONS | 7 |
| 3. | BUT DES TRAVAUX | 7 |
| 4. | PRINCIPAUX RESULTATS | 8 |
| | A. CHOIX DES CRISTAUX | 8 |
| | B. OSCILLATEURS FEMTOSECONDE BASSE PUISSANCE A BASE DE Yb :BOYS, Yb :SYS | 8 |
| | C. PROPRIETES THERMIQUES | 10 |
| | D. OSCILLATEURS FEMTOSECONDE DE FORTE PUISSANCE MOYENNE | 14 |
| | A. LES EFFICACES Yb:YSO, Yb:LSO | 15 |
| | B. LE POPULAIRE Yb :CaF ₂ | 16 |
| | C. LE CHOIX DE L'HETEROJONCTION Yb :SYS//YAG | 17 |
| | D. L'ETONNANT Yb : CALGO | 18 |
| | E. ABSORBANTS SATURABLES A SEMI-CONDUCTEURS | 20 |
| | F. AMPLIFICATEURS REGENERATIFS | 21 |
| | G. SYNTHESE | 23 |
| 5. | ENCADREMENT | 23 |
| 6. | PUBLICATION ET COMMUNICATION | 23 |

EFFETS NON-LINEAIRES ET AMPLIFICATION DANS LES FIBRES EN REGIME FEMTOSECONDE **29**

- | | | |
|----|--|----|
| 1. | INTRODUCTION | 29 |
| 2. | CADRE D'ETUDE ET COLLABORATIONS | 29 |
| 3. | BUTS DES TRAVAUX | 29 |
| 4. | PRINCIPAUX RESULTATS | 29 |
| | A. FIBRES A CRISTAL PHOTONIQUES | 29 |
| | A. AUTOCOMPRESSION ET SOURCE ACCORDABLE PAR DECALAGE RAMAN | 29 |
| | B. ÉLARGISSEMENT SPECTRAL ET COMPRESSION | 30 |
| | B. AMPLIFICATEUR A FIBRES | 31 |

A.	FOPCPA THEORIQUE	31
B.	AMPLIFICATION PARABOLIQUE	32
C.	COMPENSATION DE TOD PAR GRISMS	34
D.	COMPENSATION DE TOD PAR EFFETS NON-LINEAIRES	35
C.	SYNTHESE DES TRAVAUX	36
5.	ENCADREMENT	37
6.	PUBLICATION ET COMMUNICATION	37
SOURCES PICOSECONDE BASSE CADENCE		39
1.	INTRODUCTION	39
2.	BUT DES TRAVAUX	39
3.	CADRE D'ETUDE ET COLLABORATIONS	39
4.	PRINCIPAUX RESULTATS	40
A.	DES LONGUEURS ATYPIQUES	40
B.	DES AMPLIFICATEURS TRES PERFORMANTS	41
C.	DES LONGUEURS D'ONDE ATYPIQUES	42
D.	GENERATION DE SUPERCONTINUUM	43
5.	ENCADREMENT	45
6.	PUBLICATION ET COMMUNICATION	46
APPLICATIONS		47
1.	INTRODUCTION	47
2.	CADRE D'ETUDE ET COLLABORATIONS	47
3.	MICRO-USINAGE	47
A.	CONTEXTE	47
B.	PRINCIPAUX RESULTATS	47
4.	MICROSCOPIE	50
A.	CONTEXTE	50
B.	PRINCIPAUX RESULTATS	50
5.	SPECTROMETRIE	51
A.	CONTEXTE	51
B.	PRINCIPAUX RESULTATS	52
6.	ENCADREMENT	52
7.	PUBLICATION ET COMMUNICATION	53
NOUVELLES ACTIVITES ET PERSPECTIVES		55
1.	INTRODUCTION	55
2.	GRECO	55
A.	BUT DES TRAVAUX	55
B.	COLLABORATIONS	55
C.	DU LASER A 1.6 μ M POUR LA GREFFE DE LA CORNEE	55
3.	ILE	56
A.	BUT DES TRAVAUX	56
B.	COLLABORATIONS	57
C.	REALISATION DU « FRONT-END »	57
4.	L'AVENIR DES AUTRES ACTIVITES	58
A.	LASERS FEMTOSECONDE A BASE DE CRISTAUX DOPES A L'YTTERBIUM	58
B.	FIBRES	58
C.	LASERS PICOSECONDE BASSE CADENCE	58

5.	ENCADREMENT	58
6.	PUBLICATION ET COMMUNICATION	59
<u>CONCLUSION GENERALE</u>		61
<u>CURRICULUM VITAE</u>		62
<u>SYNTHESE DES ENCADREMENTS</u>		63
<u>LISTE DES PUBLICATIONS ET CONFERENCES</u>		64
<u>COPIES D'ARTICLES</u>		71
1.	SOURCES FEMTOSECONDE	71
2.	EFFETS NON-LINEAIRES ET AMPLIFICATION DANS LES FIBRES	71
3.	SOURCES PICOSECONDE	71
4.	APPLICATIONS	71

Introduction générale

1. Contexte scientifique

Les années 90 sont marquées par une évolution sans précédent dans le domaine des sources laser à impulsions ultrabrèves. En effet, à cette époque, ces sources bénéficient de trois avancées technologiques majeures dans leur développement. D'abord, en 1985, Strickland et Mourou¹ démontrent la technique de l'amplification d'impulsions à dérive de fréquence (Chirped Pulse Amplification ou CPA). Ensuite en 1986, Moulton² découvre un nouveau matériau laser : l'oxyde d'aluminium (saphir) dopé aux ions titane ($\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$), plus communément appelé Ti:saphir. Enfin, à l'aube des années 90, Spence, Kean et Sibbett³ réalisent pour la première fois l'auto-verrouillage de phase d'un laser Ti:saphir ; le « magic-modelocking » - aussi appelé plus tard verrouillage de phase par lentille de Kerr ou Kerr Lens Mode-locking (KLM)- vient d'être démontré. Tous les ingrédients sont alors réunis pour permettre le passage des chaînes laser aux impulsions ultra-brèves, de grands instruments de laboratoire à des outils fiables et performants, plus faciles à utiliser. Une pléthore d'applications a donc fleuri à partir de cette période dans des domaines aussi variés que la physique, la chimie, la biologie ou la médecine.

L'ère de la «technologie Ti:saphir» est née. Ce cristal montre en effet des propriétés laser hors du commun, ce qui lui a permis de supplanter les lasers femtosecondes à base de colorants. Tout d'abord, il possède un spectre d'émission extrêmement large allant de 680 nm à 1100 nm. Cette largeur spectrale permet potentiellement d'obtenir des impulsions de 3,6 fs. Expérimentalement des impulsions de 4,8 fs ont été produites ce qui correspond aux impulsions les plus courtes jamais obtenues à l'aide d'un oscillateur laser. Un autre avantage du Ti:saphir est son excellente conductivité thermique : $\kappa_c = 34 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ce qui permet une bonne évacuation de la chaleur même avec de fortes puissances de pompe. Pour toutes ces raisons, ce cristal est donc devenu en quelques années le milieu amplificateur de prédilection pour les chaînes laser femtoseconde.

Parallèlement à cette mutation technologique concernant les chaînes femtoseconde, une autre révolution apparaît dans le domaine des lasers. En effet, grâce aux énormes progrès technologiques réalisés à cette époque dans le domaine des semi-conducteurs, les diodes laser deviennent très performantes et d'une efficacité redoutable avec des rendements électriques-optiques pouvant aller jusqu'à 80 %. Ainsi, bien que l'émission laser dans les semi-conducteurs ait été démontrée dès les années 60, les diodes laser n'ont connu leur essor que lorsque la technologie de leur croissance (meilleure qualité cristalline, structures complexes à multi-puits quantiques) a véritablement été maîtrisée. Ceci a conduit à l'arrivée sur le marché de diodes émettant plusieurs watts pour un mono-émetteur à température ambiante dans les années 80. Bien que leurs qualités spatiales et spectrales soient médiocres, l'efficacité des diodes laser les rend très alléchantes pour le développement de sources laser. Comment en tirer profit dans le cadre de la technologie des lasers femtosecondes ? La solution semble résider dans le pompage par diode. Ici encore, l'idée du pompage par diode n'est pas récente ; en effet, Keyes⁴ et Quist avaient montré dès 1964 qu'il est possible d'utiliser les diodes laser pour pomper optiquement un matériau laser. Mais ce n'est que dans les années 80-90 que la révolution du pompage par diode s'est réellement mise en marche. Aujourd'hui, les lasers pompés par diodes (DPSSL⁵) sont en pleine expansion et sont le cœur des nouvelles thématiques de recherche en laser.

Le principal inconvénient du Ti:saphir est qu'il ne peut pas être pompé par diode. En effet, son spectre d'absorption se situe dans le vert ; et il n'existe pas de diode de puissance dans cette gamme de longueur d'onde. Pour profiter des avantages des diodes laser sur les chaînes Ti:saphir, il est donc nécessaire de passer

¹ D. Strickland, G. Mourou, «Compression of Amplified Chirped Optical Pulses», Opt. Commun. 55, 447-449 (1985).

² P.F. Moulton, «Spectroscopic and Laser Characteristics of TiAl_2O_3 », J. Opt. Soc. Am. B, 3, 125-133 (1986).

³ D. E. Spence, P. N. Kean, W. Sibbett, «60-fsec pulse generation from a self-mode-locked Ti:sapphire laser» Opt. Lett. 16, 42 (1991).

⁴ R.J. Keyes, T.M. Quist « Injection luminescent pumping of $\text{CaF}_2:\text{U}^{3+}$ with GaAs diode lasers », App. Phys. Lett. 4, 50-52 (1964).

⁵ De l'anglais : Diode-Pumped Solid-State Laser.

par des intermédiaires : typiquement des diodes laser en AlGaAs/GaAs émettant à 808 nm pompent un laser basé sur un cristal de Nd:YVO₄ dont l'émission laser à 1064 nm est ensuite doublée en fréquence pour obtenir du vert à 532 nm. L'avantage de la forte efficacité des diodes est, si ce n'est caduc, tout au moins très diminué. Pour la plupart des applications, à l'heure actuelle, cet inconvénient est considéré comme minime par rapport aux grandes qualités du Ti:saphir, ce qui explique la domination de ce cristal. Cependant, la recherche sur une nouvelle génération de lasers femtosecondes et picoseconde directement pompés par diode suscite un très grand intérêt car cela permet d'obtenir des sources lasers beaucoup plus performantes, simples, fiables, robustes, compactes et moins onéreuses.

2. Présentation générale

Mon expérience dans le domaine de la recherche a commencé en 1994 au LOA, avec un stage portant sur l'optique non-linéaire appliquée aux chaînes laser de haute intensité. Elle se poursuit l'année suivante dans le même laboratoire avec un stage portant sur le développement de codes informatiques pour modéliser des effets non-linéaires tels que le mélange à trois ondes en prenant en compte la dispersion de vitesse de groupe et l'autofocalisation par effet Kerr dans un plasma créé par multiphotonisation.

Mon activité de recherche au sein du Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique a débuté, quant à elle, en 1996 avec un stage de DEA sur les lasers pompés par diode à base de Cr:LiSAF sous la houlette de Patrick Georges. Des expériences corroborées par des simulations numériques ont montré de manière fine l'influence des problèmes thermiques dans les colquiriites.

Dans le but d'acquérir une expérience dans un laboratoire de recherche étranger, j'ai effectué mon service militaire au "Center for Ultrafast Optical Science" CUOS (États Unis). Durant ces seize mois, j'ai abordé de multiples domaines se rapportant aux lasers de classe TéraWatt. La majeure partie de ce travail porta sur l'étude de la déformation et de la correction de fronts d'ondes dans une chaîne TéraWatt et sur la réalisation d'un laser Cr:LiSAF multijoule pour pomper un verre dopé avec des ions ytterbium en vue de l'application pour un laser Pétawatt.

De retour en France en 1998, je débute ma thèse au sein du Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique sous la direction d'Alain Brun. Le sujet porte sur le développement de nouvelles sources laser à impulsions courtes, pompées par diodes. Une première partie de la thèse concerne le développement d'une source UV à base de microlasers amplifiés. Une seconde partie concerne l'étude d'un cristal inédit : le Ca₄GdO(BO₃)₃ dopée à l'ytterbium.

Ces travaux marquent le prélude de mes activités de recherche sur les nouvelles sources laser directement pompées par diode et délivrant des impulsions brèves. Ces travaux ont été effectués au sein du Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique depuis 2000, tout d'abord, dans le cadre d'une année de post-doctorat via une bourse de la Société de Secours des Amis des Sciences puis en tant que chargé de recherche au CNRS.

Une partie de mon travail a consisté à développer des sources pompées par diode délivrant les impulsions les plus courtes possible. Pour y parvenir, nous avons développé des lasers femtoseconde à base de nouveaux cristaux dopés à l'ytterbium. Ce sera le sujet de la première partie de ce manuscrit dans lequel seront décrits les propriétés particulières de ces cristaux ainsi que les résultats laser dans les oscillateurs femtoseconde et les amplificateurs régénératifs.

Ensuite nous verrons, dans la seconde partie, comment il est possible en utilisant des nouvelles fibres microstructurées d'améliorer les performances de ces sources femtoseconde en étendant leur gamme spectrale et/ou en réduisant la durée des impulsions émises. Nos travaux actuels sur les amplificateurs à fibres optiques dopés à l'ytterbium et les moyens d'amplifier des impulsions brèves sans les dégrader temporellement seront aussi décrits.

Un second pan de mon activité a consisté à réaliser des sources picoseconde basées sur des cristaux de Nd:YVO₄ et Nd:GdVO₄ dont la nouveauté principale repose sur des architectures inédites. Comme nous le verrons dans la troisième partie de ce manuscrit, nous avons cherché à réaliser des oscillateurs laser, soit à des longueurs d'onde atypiques, soit avec des cavités ultra-longues pour produire un laser à verrouillage des modes en phase basse cadence. Des travaux sur des amplificateurs passifs combinant fort gain et forte extraction ont aussi été réalisés.

La quatrième partie de ce manuscrit sera consacrée à la description de quelques applications découlant des différents développements sur cette nouvelle génération de source à impulsions brèves directement pompées par diode. Trois types d'applications seront détaillées : en microusinage, microscopie et spectroscopie.

La cinquième et ultime partie de ce manuscrit sera consacrée aux perspectives découlant des travaux précédents.

Sources femtoseconde

1. Introduction

Les points clefs dans le développement des nouvelles générations de sources d'impulsions brèves et énergétiques ne portent plus, comme il y a quelques années, uniquement sur le quantitatif (augmentation de l'énergie) mais plutôt sur le qualitatif : amélioration de la fiabilité, de la compacité, de l'efficacité, etc. Une des solutions pour arriver à ces fins est basée sur l'utilisation du pompage direct par diode. C'est pourquoi, depuis le début des années 2000, on assiste à une véritable explosion dans le domaine des sources femtoseconde pompées par diode à base de cristaux dopés à l'ytterbium. En effet, les propriétés exceptionnelles de l'ion ytterbium associées aux énormes avancées technologiques sur les diodes à 980 nm, ont permis d'obtenir des lasers de performance hors du commun avec ces matériaux.

Les cristaux dopés à l'ytterbium présentent des propriétés excessivement intéressantes. Tout d'abord, leur structure électronique à deux niveaux est extrêmement simple et permet d'éviter –contrairement aux autres ions trivalents de la série des lanthanides tel le néodyme– des effets parasites comme l'« upconversion » ou l'absorption par l'état excité. De plus, la charge thermique de ces cristaux est très bonne grâce à un très faible défaut quantique entre les photons de pompe et les photons produits. Enfin, les cristaux dopés à l'ytterbium présentent des spectres d'émission relativement larges permettant la génération d'impulsions très brèves. La recherche dans ce domaine est importante, en particulier dans différents laboratoires de cristallogénèse français avec lesquels nous avons collaborés afin de rester au plus haut niveau mondiale malgré une forte compétition.

2. Cadre d'étude et collaborations

L'ensemble de ces travaux résulte donc de nombreuses collaborations fructueuses. En ce qui concerne les collaborations avec les chimistes spécialistes de la cristallogénèse, une grande partie de nos travaux résulte d'une collaboration très étroite avec le Laboratoire de Chimie Appliquée de l'Etat Solide de l'Ecole Nationale Supérieure de Chimie Paris. Cette collaboration prolifique a donné lieu à l'étude de nombreux cristaux (borates, silicates, grenats et oxydes). Les travaux sur les silicates ont été également réalisés en collaboration avec le CEA LETI de Grenoble. Enfin, les travaux sur la fluorine dopée se sont faits en collaboration avec le CIRIL à Caen.

Comme nous le verrons par la suite, un composant clef des oscillateurs laser dopés à l'ytterbium est l'absorbant saturable à base de semiconducteur (SESAM) très particuliers. En effet, ces semi-conducteurs doivent être élaborés de manière à avoir des temps de relaxation rapide. Les performances de ces composants sont très dépendantes de la technologie de leur élaboration, et les résultats lasers peuvent varier énormément d'un type de composant à l'autre. J'ai ainsi collaboré avec différentes entreprises : HighQ laser, Thalès, Amplitude Système, pour l'optimisation des performances en fonction des différents cristaux.

Une partie de mes recherches a aussi consisté à étudier de nouveaux types de SESAM basée sur des technologies alternatives. Ces travaux ont été réalisés dans le cadre d'une Action Coordonnée Optique "Absorbants saturables implantés" et ont été faits en collaboration avec le Centre de Spectrométrie Nucléaire et de Spectrométrie de Masse (Université d'Orsay), l'Institut d'Electronique Fondamentale (Université d'Orsay) et School of Physics and Astronomy, University of St. Andrews, UK.

Enfin, pour avoir accès à l'indice non-linéaire de nos matériaux nous avons collaboré avec l'Université de Toronto qui maîtrise la technique du Z-scan.

3. But des travaux

L'émergence de nouveaux cristaux dopés aux ions Yb^{3+} permet des progrès cruciaux dans le domaine des lasers solides pompés par diodes et en particulier dans le domaine des lasers générant des impulsions ultra-brèves. Ces cristaux sont en effet une des clefs de voûte dans le développement d'une nouvelle génération de lasers très efficaces, fiables et compacts. Cependant, la génération d'impulsions sub-100-fs à partir de

cristaux dopés à l'ytterbium n'avait jamais encore été démontrée avant l'année 2000. Seuls les verres dopés à l'ytterbium avaient permis d'obtenir des impulsions très brèves. Cependant, leurs mauvaises propriétés thermiques restaient un handicap important pour le développement de sources de forte puissance. C'est pourquoi l'utilisation de cristaux qui avait déjà démontré de très bonnes performances en régime continu, s'avérait nécessaire. C'est pourquoi, en collaboration avec l'École Nationale Supérieure de Chimie Paris, nous avons cherché des nouveaux cristaux afin de combiner les bonnes propriétés thermiques à la possibilité de générer des impulsions ultra-brèves. Ainsi, nous avons démontré qu'il était possible de produire des impulsions de 89 fs avec un cristal d'Yb:GdCOB. Ces résultats très prometteurs nous ont poussé à chercher de nouveaux matériaux pour développer des lasers avec de meilleures performances. Deux axes ont été privilégiés. Le premier est l'obtention des durées les plus brèves possibles. Pour cela nous nous sommes intéressés à des cristaux à très larges bandes d'émission. Le second concerne la montée en puissance moyenne et nous avons donc cherché à caractériser les matériaux pouvant le mieux supporté les fortes puissances de pompe et ayant donc des bonnes conductivité thermiques. Ces deux propriétés des cristaux étant en générale antagonistes, car la première implique une matrice cristalline plutôt désordonnée (pour obtenir des environnements variés pour les différents ions Yb^{3+}) et la seconde implique de l'ordre pour une meilleure propagation des phonons. Ces deux axes de recherche ont été mené en parallèle avec des travaux en régimes continus pour mesurer la tenue d'une part aux fortes puissances par analyse de l'élévation de température et des déformations de fronts d'onde due aux contraintes thermiques et d'autre part, aux plus faibles puissances avec pour but de développer des nouveaux oscillateurs femtoseconde les plus courts possible. Ces travaux ont été soutenus par une Action Coordonnée Optique : Femtocryb. Et, les travaux sur les lasers de forte puissance ont été soutenus par la DGA à travers notamment la thèse de Sébastien Chénais et dans le cadre du GDR LASMAT (Matériaux Laser) et maintenant du réseau CMDO (Cristaux Massifs et Dispositifs pour l'Optique).

4. Principaux résultats

A. *Choix des cristaux*

Dans un premier temps, nous avons donc étudié, pour la réalisation d'oscillateur fs, les cristaux de Yb:BOYS et de Yb:SYS qui ont l'avantage d'avoir des spectres très larges mais le désavantage d'avoir des mauvaises conductivités thermiques. Ensuite, afin de permettre de plus fortes puissances de pompage nous avons étudié des solutions pour améliorer les propriétés thermiques de ces cristaux soit par du co-dopage comme avec le Yb :CaBOYS soit par des assemblages avec des cristaux non-dopés Yb :SYS//YAG, Yb :YCOB//YCOB.

En parallèle nous nous sommes intéressés à des cristaux permettant de plus fortes puissances de pompe tels que Yb :GGG, Yb :YSO, Yb :LSO puis Yb :CaF₂. Nous avons validé des nouvelles méthodes de mesures de leurs propriétés thermiques en développant des bancs de caractérisation de lentilles thermiques et de cartographie thermique pour valider la tenue aux hautes puissances de pompage des ces cristaux. Nous avons aussi traqué les différentes sources de chaleurs, notamment en mesurant le rendement quantique qui était jusqu'alors considéré à tort dans la littérature égale à 1 et en mesurant la qualité des contacts thermiques des cristaux avec le support.

B. *Oscillateurs femtoseconde basse puissance à base de Yb :BOYS, Yb :SYS*

Confortés par les résultats obtenus avec le Yb :GdCOB, nous avons étudié d'autres cristaux de la famille des borates présentant des propriétés spectroscopiques encore plus favorables pour la production d'impulsions courtes. Parmi ces cristaux, le plus intéressant est sans doute le double borate : l'Yb:Sr₃Y(BO₃)₃ ou Yb:BOYS. Ce cristal a l'avantage d'avoir un spectre d'émission relativement lisse (de forme similaire à celui des verres dopés ytterbium cf. fig. 1-1) et très large, nécessaire pour l'obtention d'impulsions brèves.

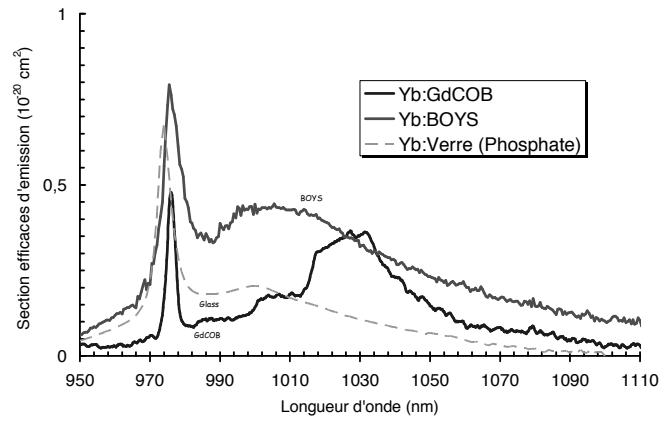


Figure 1-1. Spectres d'émission de matériaux dopés à l'ytterbium et à spectres larges.

L'Yb:BOYS a donc été utilisé dans des cavités laser pouvant permettre la production d'impulsions ultra-brèves (Fig. 1-2a) comportant une paire de prismes et un absorbant saturable rapide (SESAM). Le meilleur résultat obtenu en termes de durée est de 69 fs (Fig. 1-2b). Ce résultat constituait le record de l'époque pour les cristaux dopés à l'ytterbium. La puissance moyenne correspondante est de 80 mW, limitée par le comportement thermique du cristal.

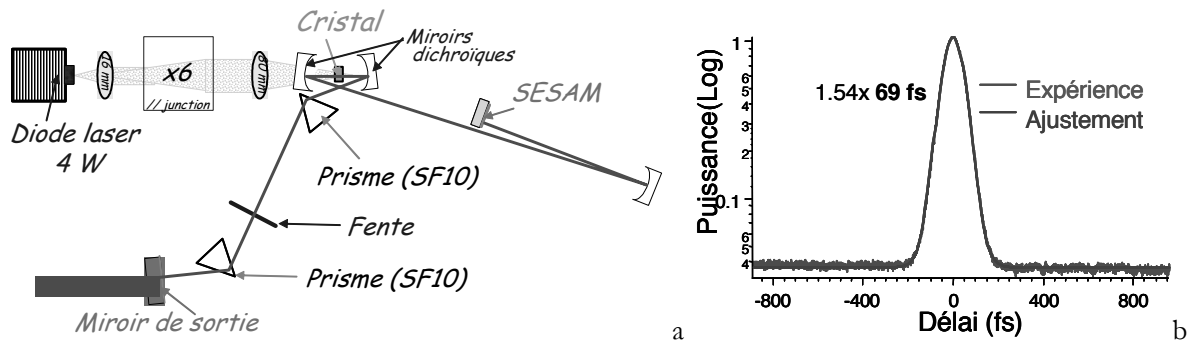


Figure 1-2. a: Schéma expérimental du laser permettant la production d'impulsions femtoseconde. b: Autocorrélation des impulsions obtenues avec ce type de laser en utilisant le cristal de Yb:BOYS.

De plus nous avons démontré avec ce cristal une très large accordabilité en longueur d'onde (de 1051 nm à 1076 nm) pour des impulsions sub-100-fs. Ce point est très intéressant car il permet la compatibilité de ces oscillateurs avec les verres dopés au néodyme qui sont utilisés sur certaines chaînes térawatt.

En parallèle aux travaux réalisés sur les borates, nous avons étudié d'autres cristaux à bandes d'émission très larges. Le but était de trouver des cristaux pouvant non seulement permettre la génération d'impulsions sub-100-fs (ayant donc des spectres larges et lisses) mais aussi avec de plus grandes sections efficaces. Pour plus d'efficacité nous avons recherché des cristaux de la famille des apatites qui sont connus –notamment les apatites fluorées– pour leur très grande section efficace d'émission et leur gain important. Parmi les apatites, nous avons mis à jour un cristal atypique, une apatite silicaté : l'Yb³⁺:SrY₄(SiO₄)₃O ou Yb:SYS. La matrice de SYS est en effet très particulière. Certains sites de Wyckoff (4f) sont aléatoirement occupés par deux atomes différents (Sr ou Y), cf. fig. 1-3a. Ce désordre cationique introduit une très grande variété d'environnements cristallins. Ainsi, lorsque le SYS est dopé avec des ions Yb³⁺, ceux-ci se substituent aux ions Y³⁺ qui ont eux-mêmes plusieurs sites (6h et 4f). Les spectres d'émission et d'absorption de l'ytterbium s'en trouvent très élargis (fig. 1-3b). L'Yb:SYS permet donc d'avoir des sections efficaces plus élevées que l'Yb:BOYS tout en gardant un spectre large et lisse.

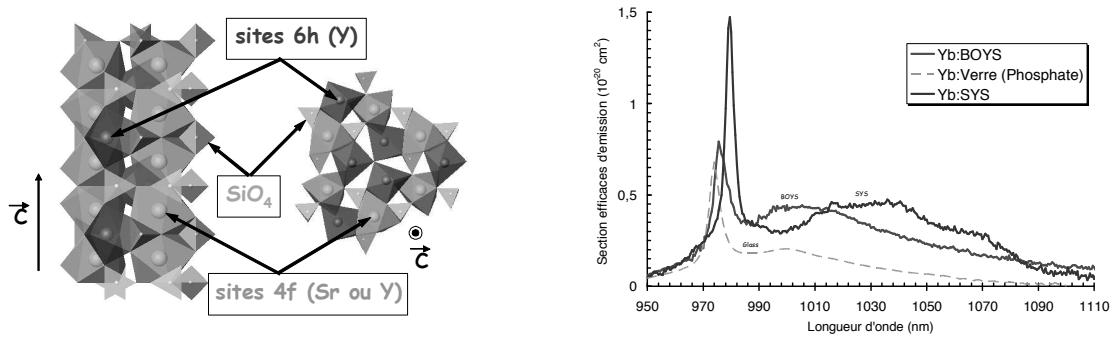


Figure 1-3. a : Structure cristalline du Yb:SYS. b. Spectres d'émission de matériaux dopés à l'Yb et à spectres larges.

L'Yb:SYS a été utilisé dans des cavités laser pouvant permettre la production d'impulsions ultra-brèves (Fig. 1-2a). Le meilleur résultat obtenu en termes de durée est de 70 fs pour une puissance moyenne de 143 mW, ce qui correspond à une énergie de 1,6 nJ par impulsions (la cadence étant de 98 MHz). Nous avons aussi démontré des impulsions plus énergétiques de 4,3 nJ (420 mW à 98 MHz) ayant des durées de 110 fs (cf. fig.1-4).

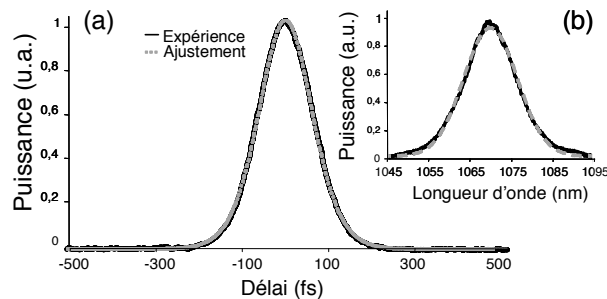


Figure 1-4. Autocorrélation (a) et spectres (b) des impulsions obtenues avec le cristal de Yb:SYS.

En conclusion, nos travaux sur les oscillateurs femtoseconde à base de SYS dopés à l'Yb ont montré des résultats (en termes de durées) comparables à ceux obtenus avec l'Yb:BOYS avec cependant plus de puissance. Les longueurs d'onde d'émissions sont elles aussi les mêmes, ce qui rend ces cristaux compatibles entre eux et avec les verres dopés au néodyme. De plus, l'Yb:SYS possède une meilleure conductivité thermique et un meilleur gain que l'Yb:BOYS, ce qui en fait un candidat plus attrayant pour le développement d'oscillateur et d'amplificateur de forte puissance autour de 1070 nm.

C. Propriétés thermiques

Dans un premier temps, les cristaux dopés à l'ytterbium à très large bande sont très intéressants pour réaliser des lasers femtoseconde. Cependant, un large spectre est généralement associé à une matrice désordonnée (comportant plusieurs sites d'accueil pour l'Yb³⁺) et à une faible conductivité thermique. Par exemple, l'Yb:BOYS possède un spectre d'émission plus large que celui de l'Yb:verre (60 nm à mi-hauteur) mais une « relativement » mauvaise conductivité thermique pour un cristal de 1,8 W/m/K (qui cependant reste tout de même deux fois plus forte que celle des verres dopés ytterbium). Le cas de l'Yb:SYS est un peu similaire, avec une conductivité de 2,2 W/m/K et un spectre d'émission de même largeur de l'Yb:BOYS. Nous avons donc essayé d'identifier et de tester des solutions destinées à améliorer le comportement thermique de ces cristaux.

Nous avons constaté sur ce type de cristaux que des chutes d'efficacité et des fractures se produisaient pour une puissance de pompe de quelques watts en pompage longitudinal par une diode fibrée. Afin de montrer clairement que la charge thermique est à l'origine des effets observés, nous avons étudié le fonctionnement laser en régime quasi-continu. Les tests ont permis d'éviter ces problèmes et d'utiliser des puissances de pompe supérieures, avec une meilleure efficacité, validant bien l'origine thermique des problèmes.

Pour résoudre ces problèmes, nous avons travaillé sur plusieurs stratégies, en collaboration avec Chimie Paris. La première solution est de travailler sur la structure même du matériau. Par exemple, dans le cas de l'Yb:BOYS, une dilatation très différente sur les deux axes est à l'origine de sa fragilité. Un matériau voisin, l'Yb:CaBOYS (Yb³⁺:Sr_{0,7}Ca_{0,3}Y(BO₃)₃), possède des coefficients plus homogènes. Il résiste effectivement mieux à la fracture, surtout en sortie du four de croissance. Cependant nous n'avons pas vu d'amélioration

significative en pompage par diode. Une autre solution consiste à réaliser un cristal « composite » comportant une partie dopée et une partie non dopée servant de radiateur, bien plus efficace que l'air ambiant pour évacuer la chaleur. Ainsi, aucune fracture n'a été observée sur le cristal composite alors que le cristal simple se brise pour une puissance de pompe de 8 W. Nous avons donc montré qu'en jouant sur la matrice (substitution de strontium par du calcium) ou en réalisant un cristal composite (SYS sur YAG), il était possible d'améliorer sensiblement les propriétés thermiques de ces nouveaux cristaux très prometteurs pour la réalisation de sources laser femtoseconde.

Les problèmes thermiques constituent un des principaux verrous pour le développement de lasers de puissance à base de cristaux dopés à l'ytterbium. Effectivement, même si les matériaux dopés à l'ytterbium sont mieux armés pour résister aux fortes puissances de pompe que les matériaux dopés au néodyme (défaut quantique plus faible, moins d'effets spectroscopiques parasites), nous avons constaté que des effets thermiques importants pouvaient apparaître dans ce type de cristaux, affectant l'efficacité du laser et menant parfois jusqu'à sa fracture. La baisse d'efficacité du laser peut avoir plusieurs origines, dont l'apparition d'une lentille thermique de très forte puissance dioptrique finissant par rendre la cavité instable. Dans un premier temps, nous avons donc mis au point un banc de mesure de lentille thermique dans les conditions de fonctionnement des cristaux. Une grande partie de cette étude a été réalisée sur des cristaux de Yb:GdCOB et Yb:YCOB qui étaient les cristaux les plus matures à notre disposition au début des années 2000. Nous avons donc utilisé ces cristaux pour valider les concepts mis en jeu dans l'étude des effets thermiques avant d'élargir notre étude aux autres cristaux dopés à l'ytterbium. Nous avons aussi par la suite mis au point un système de mesure direct du profil de température dans les cristaux afin de comprendre précisément le comportement de ces derniers lorsqu'ils sont soumis à un pompage de forte puissance.

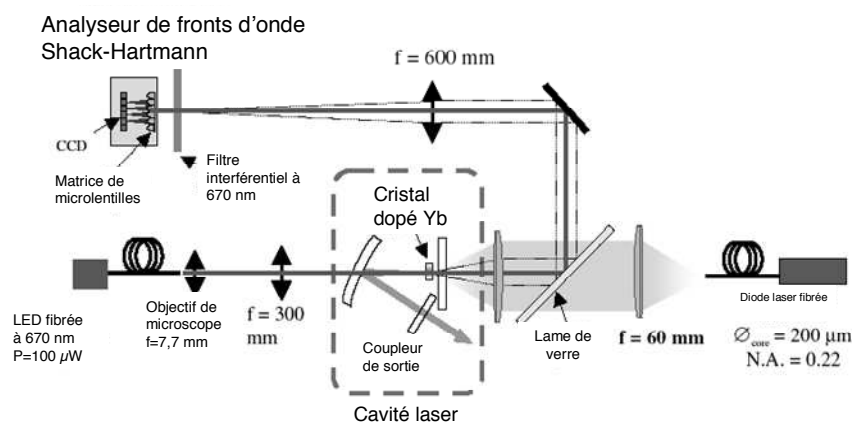


Figure 1-5 : Banc de mesure de lentilles thermiques.

Le banc (fig. 1-5) utilise un analyseur de front d'onde (Shack-Hartmann) qui analyse le faisceau sonde qui traverse le cristal. La taille du faisceau de sonde est égale à celle du faisceau laser dans le cristal afin de mesurer exactement les déformations qu'il subit. La longueur d'onde de la sonde (670 nm) est transmise par les miroirs de la cavité laser, elle est ainsi adaptée à la mesure des variations du front d'onde avec et sans effet laser.

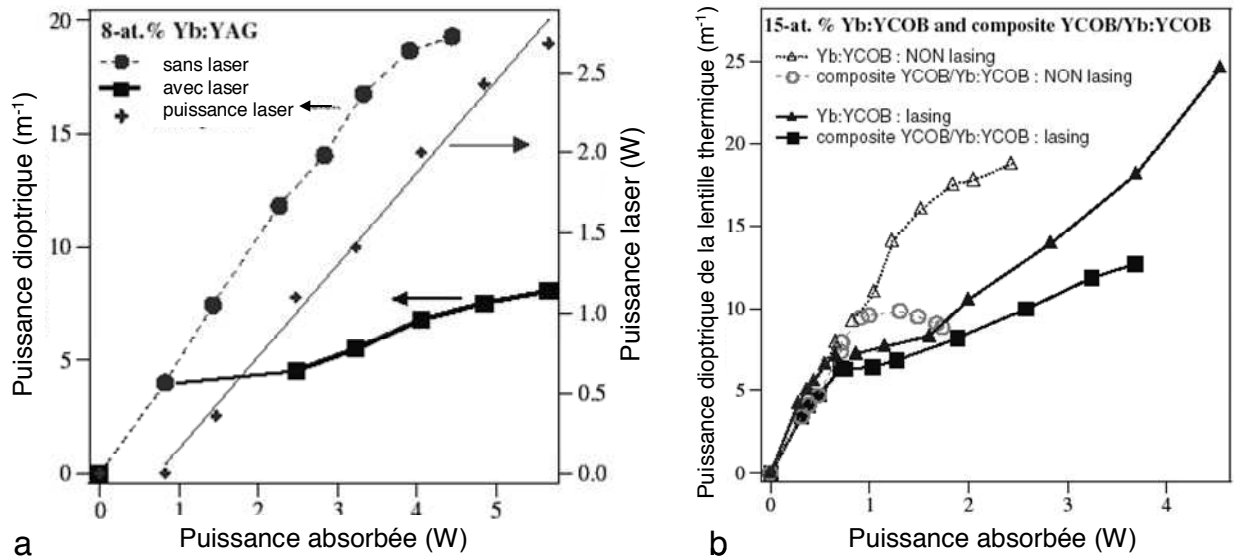


Figure 1-6. a : Evolution de la lentille thermique en fonction de la puissance de pompe (la puissance de sortie du laser est donnée sur la courbe de droite). b : Lentilles thermiques avec et sans effet laser pour deux cristaux d'Yb:YCOB et un composite Yb:YCOB/YCOB.

L'analyseur de front d'onde permet de mesurer non seulement la lentille thermique mais aussi les aberrations associées. Dans les conditions d'utilisation (faisceau laser légèrement plus petit que le faisceau de pompe), nous avons constaté que les déformations du front d'onde induites par l'échauffement du pompage se réduisaient à une lentille sphérique, convergente, non aberrante.

Les figures 1-6 donnent des exemples d'évolution de la puissance dioptrique de la lentille thermique en fonction de la puissance de pompe pour trois types de cristaux. Leur valeur dépend de l'existence ou non de l'effet laser et de la qualité du refroidissement. Par exemple, un cristal composite d'Yb:YCOB utilisant une partie d'YCOB non dopée modifie moins le front d'onde qu'un cristal d'Yb:YCOB simple.

Les mesures de lentilles thermiques que nous avons faites grâce au banc que nous avons développé font apparaître une grande différence de comportement avec et sans effet laser (fig. 1-6 et 1-7), sur quasiment tous les cristaux dopés à l'ytterbium testés. Une modélisation théorique basée sur les équations de débit nous a permis de comprendre la forme des courbes donnant la puissance dioptrique de la lentille thermique en fonction de la puissance de pompe (fig. 1-8).

Le fait le plus remarquable est la chute brutale de la puissance dioptrique dès que le seuil d'oscillation est atteint. Ce phénomène peut être compris en analysant les désexcitations possibles à partir du niveau haut de la transition laser. Trois débits doivent être considérés : la désexcitation par fluorescence, par effet non radiatif et par émission stimulée. Lorsque l'effet laser apparaît, le débit correspondant à l'émission stimulée devient prépondérant, limitant ainsi la population du niveau du haut et donc les deux autres débits (fig. 1-9), en particulier les désexcitations non radiatives qui sont sources d'échauffement. Le cristal étant moins échauffé au dessus du seuil laser, la lentille thermique a une puissance dioptrique plus faible.

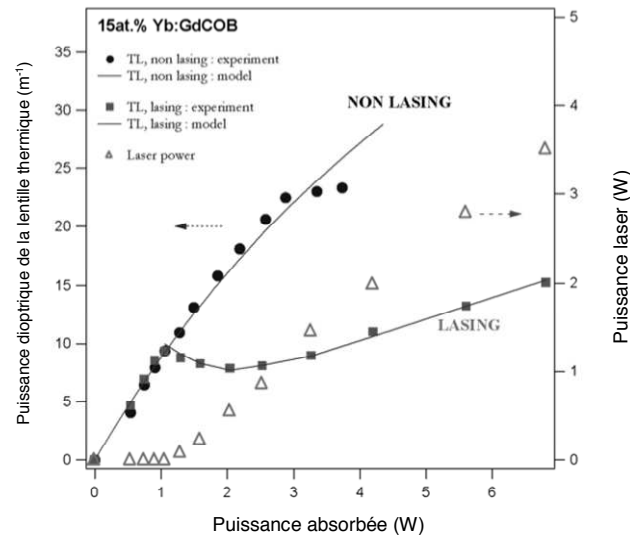


Figure 1-7. Evolution théorique et expérimentale de la lentille thermique en fonction de la puissance de pompe sur Yb:GdCOB.

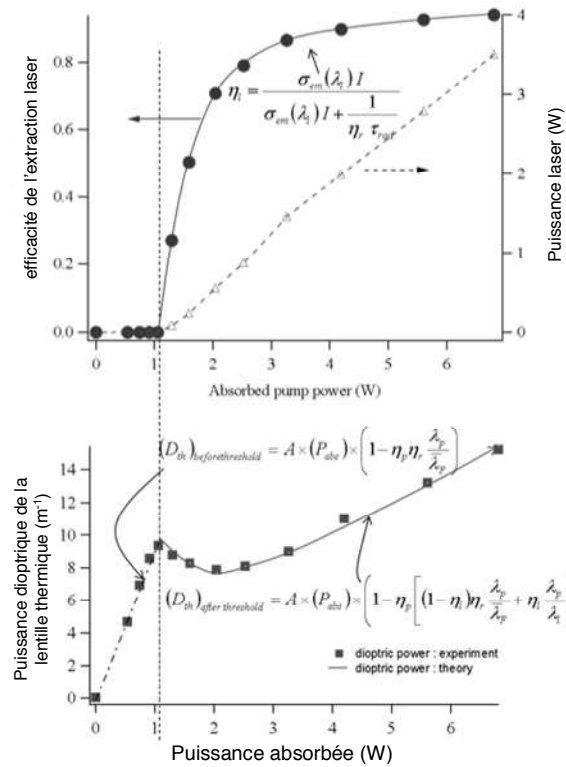


Figure 1-8. La courbe du milieu donne le rendement d'extraction laser. La courbe du bas reprend une partie de la figure 1-1 avec les formules théoriques associées.

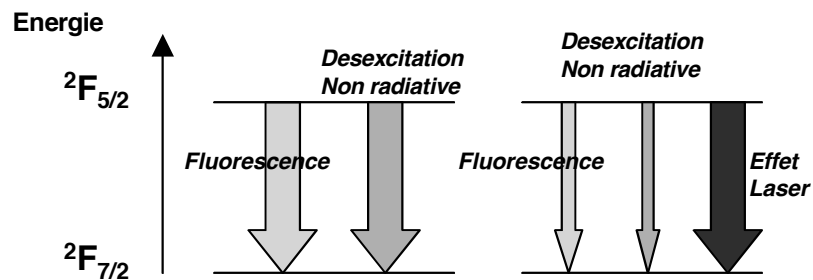


Figure 1-9. Importance relative des différents débits de population à partir du niveau du haut de la transition laser.

La forme des courbes représentant la puissance dioptrique (fig. 8) prouve clairement qu'il existe des désexcitations non radiatives dans les cristaux dopés ytterbium, ce qui n'avait jamais été clairement démontré jusqu'alors et qui est fondamental dans le développement de lasers de puissance. Les calculs que nous avons menés nous ont permis de déduire une valeur du rendement quantique de fluorescence (débit de fluorescence divisé par la somme des débits) pour les différents cristaux testés. Par exemple pour le cristal d'Yb:GdCOB dont les résultats sont présentés sur les figures 8 et 10, ce rendement ne vaut que 71%.

En parallèle aux mesures de lentilles thermiques, nous avons mis au point une méthode simple pour mesurer directement la température absolue à la surface d'un cristal, lorsqu'il est pompé longitudinalement par diode laser (fig. 1-10a). La technique se base sur une caméra infrarouge sensible dans la bande 8-12 μm , et permet de cartographier de façon absolue la température avec une excellente résolution spatiale (de l'ordre de quelques dizaines de μm). Grâce à une calibration adéquate du système, nous avons accès à une valeur absolue de la température dans le cristal. On peut ainsi obtenir des informations relatives au comportement sous fort pompage du matériau (lentille thermique, fracture...). Une étude systématique de l'influence du contact thermique sur la distribution de température a été menée, ainsi que la mesure des coefficients de transfert H pour différents types de contacts thermiques largement utilisés (fig. 1-10b) (indium, graisse thermique, carbone et contact nu).

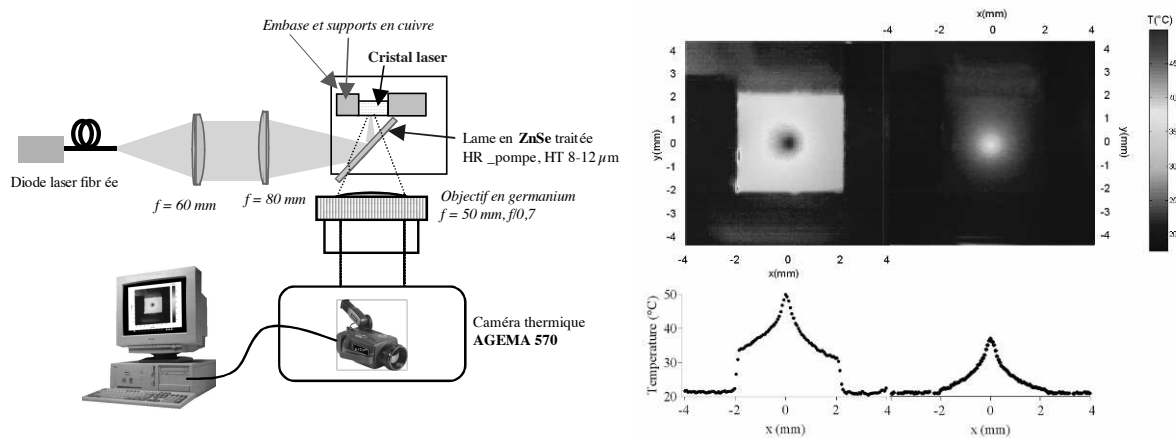


Figure 1-10 a. Schéma du dispositif expérimental pour la mesure directe du profil de température dans un cristal. b. Mesures directes du profil de température dans un cristal pour deux types de contacts thermiques différents : sans et avec graisse thermique.

Ce système d'imagerie est utilisé notamment pour analyser l'influence du dopage par des ions ytterbium sur les propriétés thermiques (telle que la conductivité thermique). Ainsi, nous avons, entre autre, caractérisé le comportement thermique de cristaux dopés Yb comme le LSO ou l'YSO pour voir l'influence de la substitution des ions terres rares. Ce système d'imagerie thermique n'est pas exclusivement réservé aux cristaux dopés à l'ytterbium et peut aussi être implémenté avec des matériaux dopés Nd ce qui permet par exemple de quantifier l'intérêt que présente le cristal de Nd:GdVO₄ par rapport au cristal de Nd:YVO₄ du fait de sa meilleure conductivité thermique. Des études relatives à l'influence du niveau de dopage des cristaux sur les gradients de température induits dans les matériaux sont également en cours afin d'améliorer notre compréhension des effets non-radiatifs susceptibles d'influer sur les performances des lasers solides.

Enfin, dans une problématique plus appliquée, de nombreux industriels sont intéressés par ce nouveau moyen de caractériser la qualité de la gestion des effets thermiques par leurs montures. Dans le cadre de ces études, des partenariats avec des industriels (CILAS, mais aussi Amplitude Système qui commercialise déjà des lasers femtosecondes à base de cristaux de Tungstate dopés à l'ytterbium) ont été mis en place.

D. Oscillateurs femtoseconde de forte puissance moyenne

En 2004, nous nous étions arrêtés à deux types de cristaux : soit des cristaux plus spécifiquement adaptés au développement de lasers à impulsions ultrabrèves tels que l'Yb:BOYS (Yb:SrY(BO₃)₃) et l'Yb:SYS (Yb:SrY₄(SiO₄)₃), soit des cristaux plus spécifiquement adaptés à des applications de fortes puissances tels que l'Yb:YSO (Yb:Y₂SiO₅), l'Yb:LSO (Yb:Lu₂SiO₅), Yb:CaF₂. Il restait à démontrer les performances en régime impulsif des cristaux adaptés au pompage de forte puissance et capable de produire de très fortes puissances moyennes.

Pour ces expériences nous avons mis au point des oscillateurs d'une géométrie différente que ceux développés à faible puissance utilisés dans mes précédents travaux. En effet, l'utilisation d'une diode de plus

forte puissance impose paradoxalement des faisceaux de pompe moins brillants donc des modes spatiaux plus importants, générant moins de gain dans la cavité. Cette contrainte, ajoutée au fait que l'on souhaite extraire le maximum de puissance de la cavité, impose généralement l'utilisation de nouveaux types d'éléments intracavité tels les miroirs « chirpés » (pour compenser la dispersion de vitesse de groupe en remplacement des prismes) qui présentent moins de pertes, mais aussi un ajustement plus fin des paramètres de la cavité pour obtenir des régimes impulsionsnels stables. Un exemple de cavité produisant une forte puissance moyenne est présenté sur la figure 1-11.

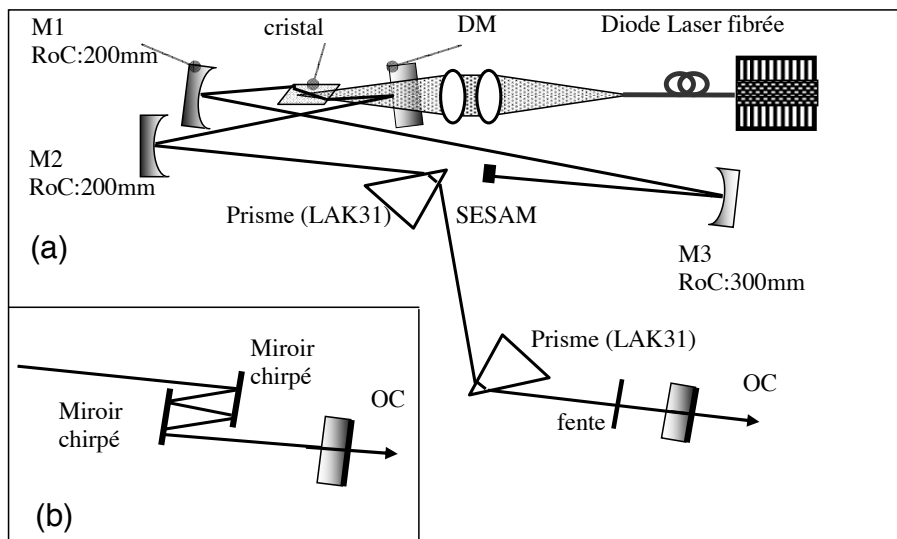


Figure 1-11. Schéma expérimental d'un oscillateur femtoseconde de forte puissance. La dispersion peut être compensée par des prismes ou (de manière plus adéquate pour ce type de cavité) par des miroirs « chirpés » (miroirs à interféromètre Gires-Tournois.)

a. Les efficaces Yb:YSO, Yb:LSO

Parmi les matériaux identifiés pour générer de forte puissance moyenne, les cristaux de la famille des oxy-orthosilicates se sont montrés particulièrement attractifs. Ces matériaux présentent des conductivités supérieures aux cristaux précédemment utilisés tels le Yb:SYS ou Yb:BOYS (YSO = 4.4W/K/m ; LSO = 5.3W/K/m ; tungstates = 3.8W/K/m ; SYS = 2.85/1.5 W/K/m). Ainsi, même si leur largeur spectrale est moindre par rapport à ces derniers cristaux, ils sont un bon compromis pour réaliser des oscillateurs de forte puissance et pour produire des impulsions assez brèves (Fig. 1-12).

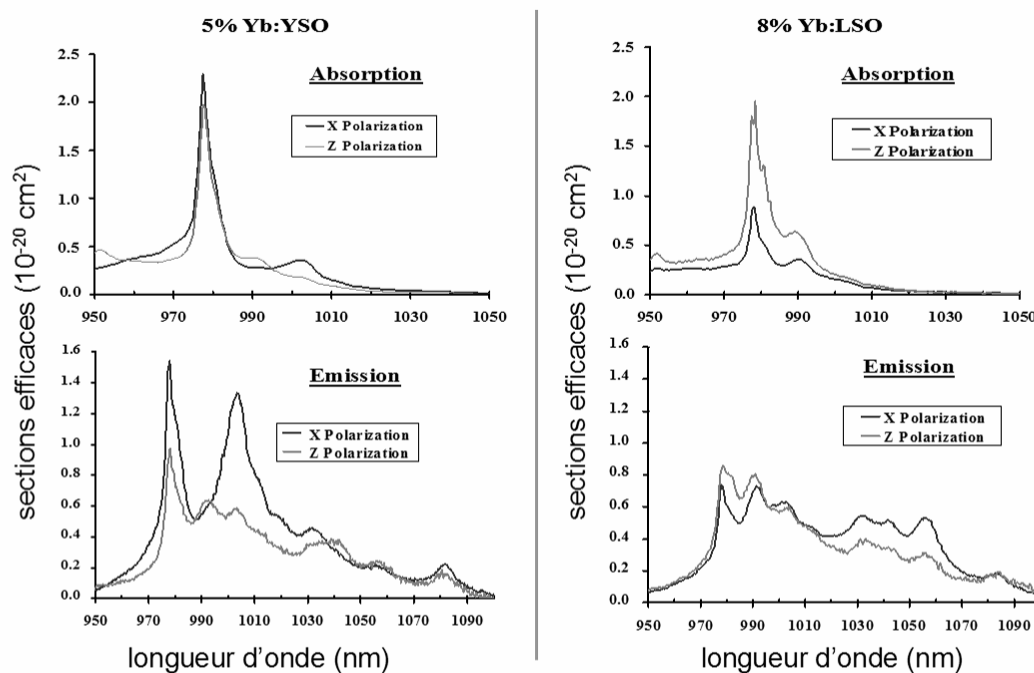


Figure 1-12. Spectres d'émission et d'absorption de Yb:Y₂SiO₅ et Yb:Lu₂SiO₅

Les échantillons de Yb:YSO et Yb:LSO testés ont été tirés par tirage Czochralski au CEA Leti avec des dopages respectifs de 5 et 8 % en ytterbium.

Nous avons d'abord introduit les prismes pour compenser de manière précise la dispersion de vitesse de groupe dans la cavité et ainsi optimiser le régime solitonique pour les impulsions les plus brèves possibles. Nous avons démontré avec l'Yb:YSO des impulsions de 122fs pour une puissance moyenne de 410mW, avec une raie de largeur 9.4nm centrée à 1041nm. Contrairement aux cristaux à spectre lisse (type Yb:SYS), l'accordabilité de l'Yb:YSO reste limitée, séparée en trois régions distinctes (1034-1034nm ; 1039-1043nm et ≈ 1046 nm), les puissances moyennes variant entre 230mW et 800mW.

Dans la même configuration, Yb:LSO a démontré la production d'impulsions de 257fs pour une puissance moyenne de 430mW correspondant à un spectre de 5.4nm centrée à 1059nm.

Nous avons ensuite remplacé les prismes par des miroirs GTI (Gires-Tournois Interferometre), qui introduisent bien moins de pertes, et permettent donc d'atteindre des niveaux de puissance supérieurs (fig. 1).

Dans cette configuration, Yb:YSO émet une puissance de 2.61W avec des impulsions de 198fs, soit une bande d'émission de 5.8nm centrée à 1044nm. Yb:LSO n'est pas en reste avec un régime de fonctionnement stable à 2.6W et des impulsions de 260fs, avec une largeur spectrale de 4.6nm centrée une fois de plus 1059nm. A notre connaissance, ces résultats sont les meilleurs -en terme de puissance - reportés dans des cavités aussi simples, pour des matériaux dopés Yb³⁺ pompés par diode en régime femtoseconde. Ils correspondent à des efficacités optique-optique record de 17%. Le laser fonctionnant à 75MHz (cavité ≈ 2 m), l'énergie par pulse vaut ≈ 35 nJ, menant à des puissances crête respectives de 168kW pour Yb:YSO et 135kW pour Yb:LSO.

Nous avons également obtenus les impulsions les plus courtes fournies par le Yb:LSO avec ce dispositif: 233fs avec une puissance moyenne supérieure à 1.1W, soit une largeur spectrale de 5.2nm toujours centrée à 1059nm.

Nous avons donc démontré pour la première fois le fonctionnement de YSO et LSO dopés ytterbium en régime femtoseconde. Ce sont des matériaux particulièrement efficaces qui ont fournis tous deux plus de 2.6W de puissance de sortie, avec des durées de pulse respectives de 198fs et 260fs, et une efficacité optique-optique record supérieure à 17%. Ils sont de plus fabriqués industriellement en grande dimension depuis des années pour les applications de scintillations (avec un dopage Cérium), et pourraient donc être une solution d'avenir pour les lasers compacts émettant plusieurs watts dans le proche IR.

b. Le populaire Yb:CaF₂

Dans l'optique de réaliser des sources femtoseconde de forte puissance moyenne, nous nous sommes intéressés à la fluorine dopée à l'ytterbium (Yb:CaF₂). L'approche ici est légèrement différente du cas des cristaux Yb:YSO et Yb:LSO. En effet, on choisit ici un cristal de géométrie extrêmement simple (structure cubique) qui a l'avantage d'avoir une conductivité très élevée mais aussi d'être facile à faire croître en grandes dimensions (par la méthode de croissance Bridgman-Stockbarger notamment, voir les développement de ce cristal pour la photolithographie UV); de plus la perspective de faire des cristaux céramiques est séduisante du point de vue industriel. Cette structure simple n'est *a priori* pas compatible avec des spectres larges. Cependant, dans le cas du Yb:CaF₂, le dopage par substitution d'ions de valences différentes a tendance à modifier l'environnement des ions ytterbium (par des phénomènes d'agrégation), et ainsi à élargir le spectre d'émission (cf. figure 1-13).

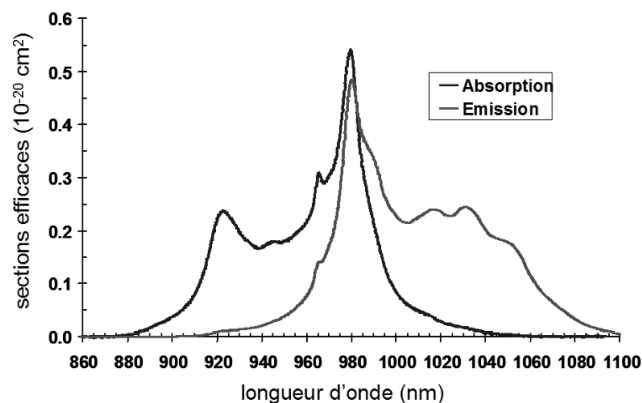


Figure 1-13. Spectres d'émission et d'absorption de la fluorine dopée à l'ytterbium

Les premiers essais ont été effectués à l'aide d'une cavité à bras repliés composée de deux prismes permettant de compenser les phénomènes de dispersion induits par les éléments optiques de la cavité. Avec un cristal dopé 5% at. en ions ytterbium, des impulsions de 150fs et de 220fs avec des puissances moyennes respectives de 880mW et 1.4W et un taux de répétition de 85MHz, ont été obtenues. Le remplacement des prismes par des miroirs « chirpés », a permis d'obtenir des impulsions de 230fs pour une puissance moyenne de 1.8 W, ce qui correspond à des énergies de 20nJ avec des puissances crêtes de 85kW. La fluorine dopée Yb^{3+} présente donc un potentiel très important pour la réalisation de lasers à impulsions brèves à bon rendement optique-optique, avec un intérêt industriel certain grâce à la très grande connaissance que l'on a de ce cristal.

c. Le choix de l'hétérojonction $\text{Yb}:\text{SYS}/\text{YAG}$

La troisième approche pour augmenter la puissance des oscillateurs femtoseconde à base de cristaux dopés à l'ytterbium est la technique d'assemblage appliquée à un cristal tel le $\text{Yb}:\text{SYS}$, qui permet d'obtenir des impulsions brèves mais qui ne tient pas la puissance. Cette technique consiste à coller au cristal dopé un bout de cristal non dopé qui va jouer le rôle d'évacuateur de chaleur, comme le montrent les simulations (fig. 1-14).

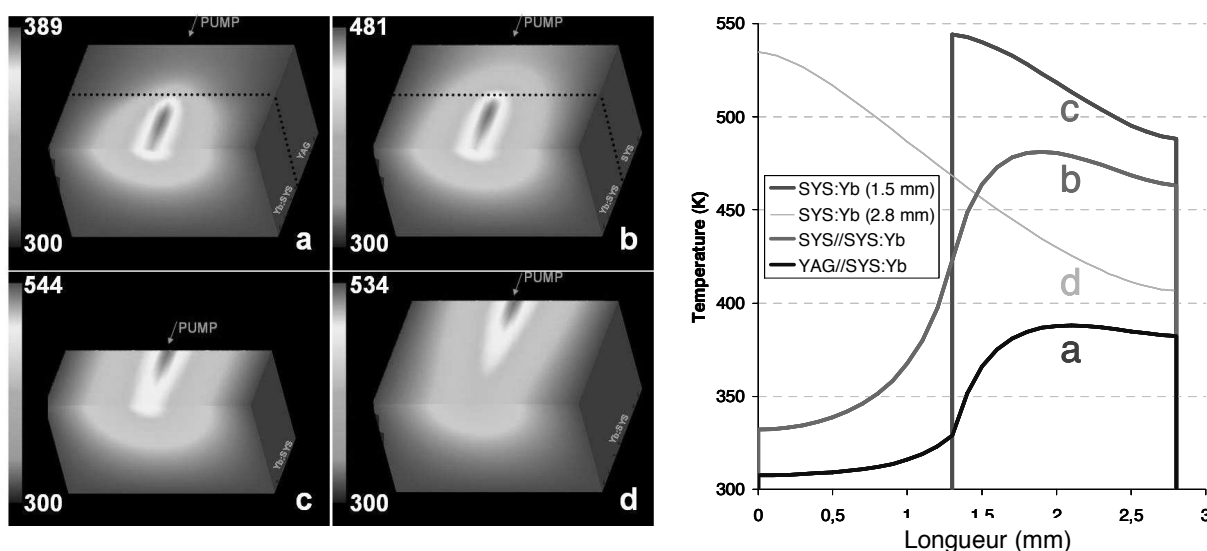


Figure 1-14. Etude de l'influence de l'assemblage sur l'échauffement d'un cristal de $\text{Yb}:\text{SYS}$. Cas (a) cas de l'hétéro-assemblage YAG sur $\text{SYS}:\text{Yb}$, cas (b) cas de l'homo-assemblage SYS sur $\text{SYS}:\text{Yb}$, cas (c) et (d) cas de cristaux $\text{SYS}:\text{Yb}$ non assemblés pour deux longueurs différentes.

Dans un premier temps, nous avons modélisé l'influence de l'assemblage sur l'échauffement de différents cristaux ($\text{Yb}:\text{SYS}$, $\text{Yb}:\text{BOYS}$, etc). Nous nous sommes intéressés à la différence entre l'homo-assemblage et l'hétéro-assemblage ; la première technique étant plus simple à réaliser mais moins performante. En effet, l'hétéro-assemblage permet d'utiliser des "cristaux radiateurs" avec de très bonnes conductivités thermiques (qui permettent de mieux évacuer la chaleur) mais nécessite un accord de maille entre les cristaux non-dopés et dopés pour permettre une bonne adhésion. Or cet accord de maille existe entre le YAG et le $\text{SYS}:\text{Yb}$, l'ENSCP a pu donc réaliser ce type d'assemblage.

Ce cristal $\text{Yb}:\text{SYS}/\text{YAG}$ a été utilisé dans des cavités laser pouvant permettre la production d'impulsions ultra-brèves (Fig. 1-11). Le meilleur résultat obtenu en terme de durée est de 122 fs pour une puissance moyenne de 0.49 W. Cependant une puissance moyenne de 1 Watt a été obtenue pour des impulsions de durée de 130 fs. (Figure 1-15).

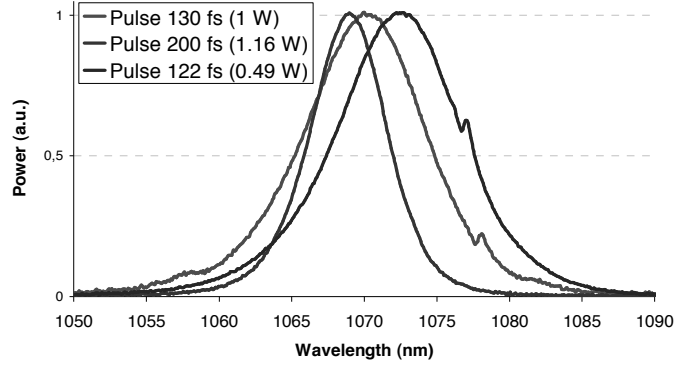


Figure 1-15. Spectres des impulsions générées avec l'Yb:SYS//YAG.

d. L'étonnant Yb:CALGO

En parallèle à ces travaux sur la montée en puissance, nous avons aussi poursuivi l'étude de nouveaux cristaux dopés à l'ytterbium, toujours avec le même objectif initial: réduire la durée des impulsions issues de ces oscillateurs sous la barre des 50 fs. Les performances que je vais présenter maintenant concernent le tout dernier né des cristaux dopés à l'ytterbium pour la génération d'impulsions femtoseconde : l'Yb³⁺:CaGdAlO₄ (Yb:CALGO).

Les échantillons d'Yb³⁺:CaGdAlO₄ proviennent d'une boule réalisée à Chimie Paris par la méthode de croissance de Czochralski. Cette boule dopée à 2-at.% a été obtenue à une température de fusion de 1700°C dans un four à atmosphère d'azote. Dans cette structure tétragonale (classe de symétrie I4/mmm), les ions Yb³⁺ substituent aussi bien les ions Gd³⁺ que les ions Ca²⁺ dans des sites de symétrie C_{4v} ce qui est particulièrement propice à la création du désordre structural nécessaire à l'élargissement des spectres, cet élargissement étant encore accentué par la nécessaire compensation des charges qui s'effectue lors de la substitution des ions Ca²⁺ par les ions Yb³⁺. La conductivité thermique de ce matériau a été mesurée suivant les deux axes principaux du cristal a et c et est respectivement de $\kappa_a = 6.9 \text{ W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$ et de $\kappa_c = 6.3 \text{ W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$ ce qui est particulièrement bon pour ce type de matériaux. La Figure 1-16 montre les sections efficaces de gain pour les deux polarisations σ et π de ce cristal uniaxe. La section efficace d'absorption maximale est observée dans la configuration π à la longueur d'onde de 979 nm ($2.7 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$). De plus, la polarisation σ possède une section efficace d'émission particulièrement plate et lisse entre 1000 nm et 1050 nm ce qui est très propice à la génération d'impulsions à spectre large i.e. ultra-courtes. Ce plateau exceptionnel (d'autant plus que pour un cristal qui a une bonne conductivité thermique) a été expliqué par l'existence de deux sites différents pour l'ytterbium qui ont deux profils de spectres d'émission totalement complémentaires : l'un en bosse de chameau, l'autre en bosse de dromadaire (fig. 1-16b). Le temps de vie du matériau et l'indice du matériau ont été mesurés et valent respectivement 0,42 ms et 1,85.

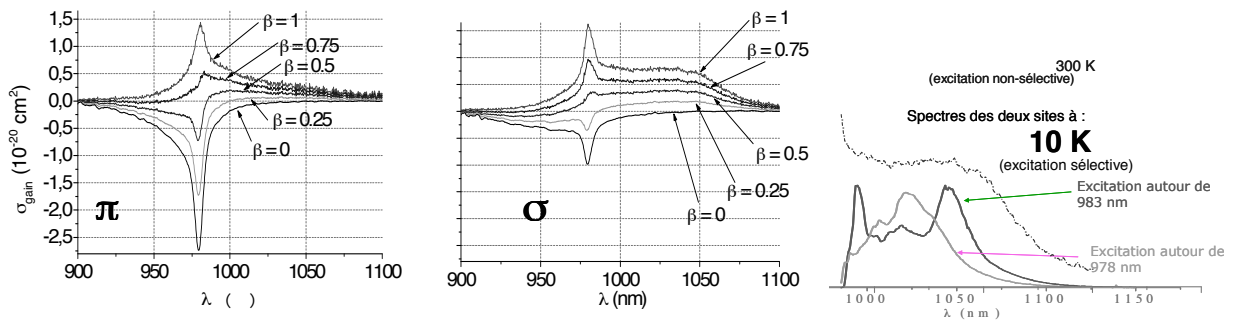


Figure 1-16a : Sections efficaces de gain suivant les deux polarisations σ et π pour un cristal d'Yb:CaGdAlO₄. β correspond au taux d'inversion de population. $\beta=0$ et $\beta=1$ correspondent respectivement aux sections efficaces d'absorption et d'émission. b : Origine du plateau dans le spectre d'émission du Yb:CALGO.

Le schéma de l'expérience est proposé Figure 1-17. Cette configuration a été utilisée pour produire des impulsions ultra-brèves à partir d'un cristal de 2,5 mm, dopé à 2-at.% d'Yb³⁺:CaGdAlO₄ directement pompé par une diode laser fibrée de forte brillance (5W avec un diamètre de fibre de 50 μm , ouverte à 0,2). Cette diode laser, qui émet jusqu'à 4,6W à 979 nm, est mise en forme par deux triplets de focale 72 mm afin d'obtenir un diamètre de 50 μm au point de focalisation dans le cristal. Le miroir absorbant saturable à semi-

conducteur (SESAM) est de faible profondeur de modulation ($\Delta R < 1\%$) avec une fluence de saturation ($F_{\text{sat}} \sim 100 \mu\text{J}/\text{cm}^2$) pour obtenir un verrouillage de mode efficace. La dispersion positive du cristal est compensée à l'aide d'une paire de prismes en SF 10 séparés d'une distance de 31 cm. Afin de compenser la dispersion spatiale existante en sortie de l'oscillateur, nous plaçons une deuxième paire de prismes extra-cavité également espacés de 31 cm et compensons ensuite la dispersion positive résiduelle grâce à un compresseur à prisme en double-passage.

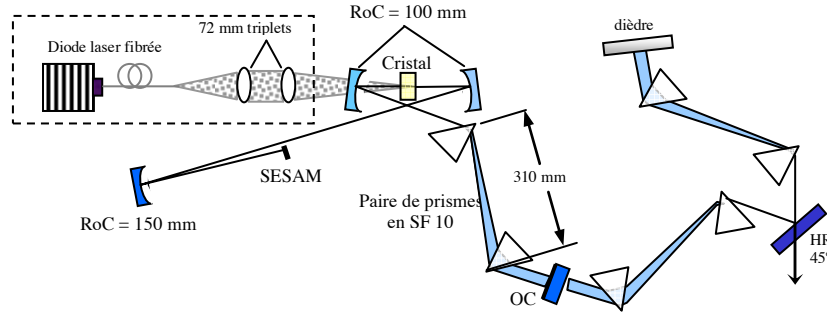


Figure 1-17 : Schéma expérimental de l'expérience menée autour d'un cristal d'Yb:CaGdAlO₄ de 2,5 mm dopé à 2-at.%.
RoC : rayon de courbure, OC : coupleur de sortie, SESAM : miroir absorbant saturable à semi-conducteur.

Avec un tel dispositif, nous avons pu obtenir une puissance moyenne maximale de 250 mW en continu avec un coupleur de sortie de 2%, en mettant un miroir HR à la place du SESAM. En insérant le SESAM, nous avons pu verrouiller les modes en phase de l'oscillateur et obtenu des spectres d'émission de 24,7 nm de largeur à mi-hauteur centrés à 1050 nm. Après les étages de compression de la dispersion spatiale et de la dispersion positive résiduelle, nous avons procédé à une autocorrélation en intensité et obtenu une durée minimale de 47 fs (Fig. 1-18). Cette durée, est à notre connaissance, la plus courte jamais obtenue avec des matériaux massifs dopés aux ions ytterbium. Ces impulsions ont par ailleurs été obtenues à la fréquence de répétition de 109 MHz, avec une puissance moyenne de 48 mW en sortie de l'oscillateur. C'est à notre connaissance, les impulsions les plus courtes jamais obtenues avec un matériau massif dopé à l'ytterbium.

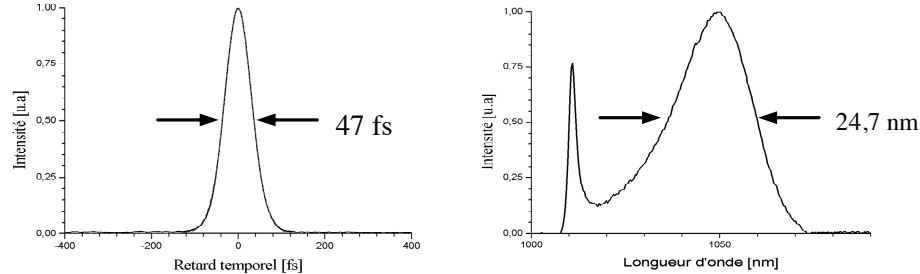


Figure 1-18 : Schéma expérimental de l'expérience menée autour d'un cristal d'Yb:CaGdAlO₄ de 2,5 mm dopé à 2-at.%.
RoC : rayon de courbure, OC : coupleur de sortie, SESAM : miroir absorbant saturable à semi-conducteur.

Grâce aux bonnes propriétés thermiques de ce cristal, nous avons pu réaliser un oscillateur haute-puissance. Le montage expérimental est représenté Fig. 1-19. Un cristal d'Yb:CALGO de 2.5 mm de longueur est pompé directement grâce à une diode laser fibrée (LIMO) de 400 μm de cœur délivrant une puissance de 15 W à 980 nm. Le faisceau laser est focalisé sur le cristal grâce à deux miroirs de rayon de courbure de 200 mm. Deux GTI, apportant une dispersion de -550 fs² chacun, sont insérés dans la cavité pour compenser la dispersion positive introduite par le cristal. Un absorbant saturable semi-conducteur (SESAM) est utilisé pour initier et stabiliser le régime verrouillé en phase. Les meilleures performances ont été réalisées avec un coupleur de sortie de transmission de 5 %. Pour éviter une post-compression extra cavité, les miroirs de la cavité, excepté les miroirs dichroïques, ont été choisis pour leur faible dispersion ($< 20 \text{ fs}^2$).

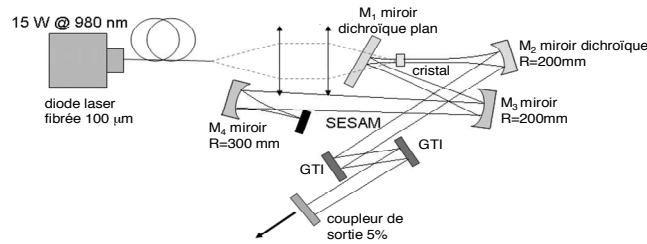


Figure 1-19. la cavité laser haute puissance pour le Yb :CALGO

Le spectre des impulsions produites est présenté sur la figure 1-20. Le spectre, centré à 1050 nm, a une largeur spectrale de 18.5 nm. Un second pic est observé à 1007 nm dans les basses longueurs d'onde du spectre. Cette longueur d'onde correspond à une fréquence de coupure des miroirs dichroïques présents dans la cavité. Le profil temporel obtenu par une mesure "FROG" (Fig. 1-13) nous montre une impulsion sécante hyperbolique, avec une durée de 68 fs. Le produit $\Delta\nu\Delta t$ vaut 0.34, proche de la limite de Fourier directement en sortie d'oscillateur. La puissance moyenne obtenue est de 520 mW pour une cadence de 105 MHz.

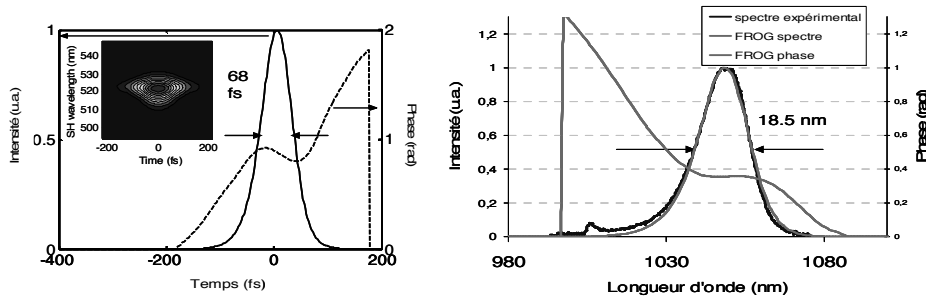


Figure 1-20. Impulsions temporelles (avec insertion de la trace FROG) et spectre de l'impulsion

E. Absorbants saturables à semi-conducteurs

L'utilisation d'un absorbant saturable rapide est un point clef dans le développement d'oscillateurs femtoseconde à base de matériaux dopés à l'ytterbium ; c'est en effet la seule technique qui a permis jusqu'alors d'obtenir un train d'impulsions stables avec ce type de matériaux. En effet, pour démarrer le régime de verrouillage de modes en phase et générer le train d'impulsions femtoseconde, il est nécessaire d'avoir dans la cavité laser des composants ayant des pertes variables en fonction de la puissance crête du faisceau laser. Pour cela, il existe deux techniques : soit on utilise l'effet de lentille de Kerr associé à une cavité en limite de stabilité (Kerr Lens Modelocking KLM), soit on utilise un absorbant saturable rapide (de temps de relaxation de 1 à 10 ps) à base de semi-conducteur aussi appelés Semiconductor Saturable Absorber Mirror (SESAM) ou Semiconductor Bragg Mirror (SBR), cf. Fig. 1-21.

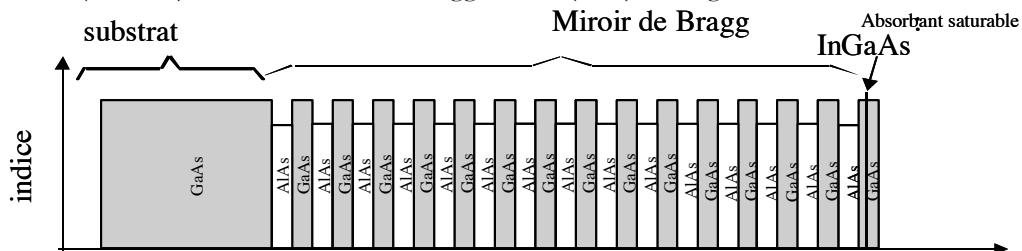


Figure 1-21. Schéma d'un SESAM ou SBR.

Or le problème majeur des matériaux dopés à l'Yb réside dans un long temps de vie du niveau excité (typiquement 1 ms) et un gain relativement faible. Ces deux propriétés ne sont pas favorables au KLM. C'est pourquoi les rares expériences de laser femtoseconde à base de cristaux dopés à l'ytterbium et utilisant le KLM n'avaient conduit qu'à de résultats médiocres en termes d'efficacité et de stabilité du régime femtoseconde. Ainsi, même si les résultats en termes de durée sont en général meilleurs en KLM qu'avec un SESAM (car le KLM n'apporte aucune limite spectrale), le KLM reste une solution peu fiable tant les problèmes de stabilité sont importants. La solution qui consiste à utiliser des semi-conducteurs (ici du

InGaAs) semble donc la plus adaptée pour ce type de matériaux. Cependant, comme il est nécessaire d'avoir des temps de recombinaison de l'absorption les plus courts possibles, on doit introduire des défauts dans le semi-conducteur. Les absorbants saturables jusqu'alors utilisés étaient épitaxiés à basse température (SESAM) pour créer des défauts dans le réseau cristallin et donc des pièges. La solution alternative que nous avons explorée, dans le cadre de l'ACO "Nouveaux absorbants saturables pour laser impulsif infrarouge tout solide" était basée sur l'utilisation d'absorbants saturables rendus rapides par des techniques d'implantation (ou d'irradiation) ionique de semiconducteurs. Cette solution était plus souple et plus simple que celle des SESAM. En collaboration avec le CSNSM d'Orsay nous avons donc bombardé des SBR avec des ions Nickel (Ni) et oxygène (O) à des hautes énergies typiquement 12MeV pour l'O et 9.5MeV pour le Ni avec des densités de l'ordre de 10^{12} cm^{-2} . Afin de visualiser l'effet des défauts créés nous avons regardé la photoluminescence des matériaux implantés (Ni et O) et non-implantés (Fig. 1-22a).

Nous avons ensuite testé ces différents SBR dans des cavités femtoseconde. Le seul échantillon ayant permis la production d'impulsions femtoseconde est celui implanté par des ions oxygène. Les autres présentaient soit trop soit pas assez de défauts. Nous avons obtenu des impulsions de 380 fs pour une puissance moyenne de 250 mW (fig. 1-22b et c).

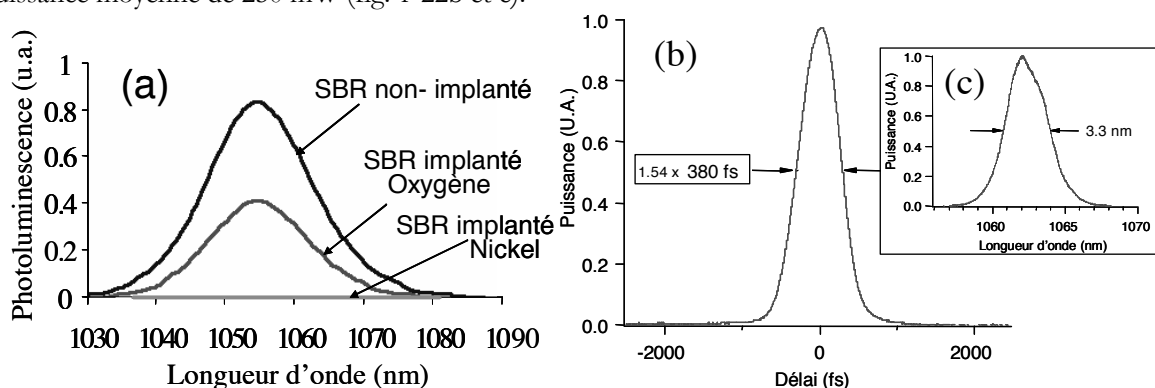


Figure 1-22 a. Photoluminescence des SBR implantés. Autocorrélation (b) et spectre(c) des impulsions obtenues en cavité laser femtoseconde avec le cristal de Yb:BOYS.

Même si les durées sont encore élevées, nous avons montré la possibilité d'utiliser des SBR implantés comme solution alternative aux SESAM crûs à basse température. Le problème actuel de nos SBR est qu'ils introduisent trop de pertes non saturables ; une solution consisterait à les recuire pour éviter ce problème.

F. Amplificateurs régénératifs

Les bons résultats obtenus avec les oscillateurs femtoseconde à base de nouveaux cristaux dopés à l'ytterbium de type Y:SYS et Yb:BOYS, nous ont incité à les utiliser en amplificateurs. En effet, nous avons vu que ces cristaux ont permis de développer des oscillateurs générant des impulsions sub-100-fs. Ainsi, afin d'augmenter l'énergie de ces impulsions (de l'ordre du nJ au niveau des oscillateurs), nous avons décidé de développer un amplificateur à base de Yb:SYS. A cause des énormes puissances crêtes mises en jeu dans les amplificateurs femtoseconde, il est nécessaire d'utiliser la technique de l'amplification par dérive de fréquence (CPA) afin de ne pas endommager les optiques de l'amplificateur (Fig. 1-23a). De plus, à cause du faible gain inhérent aux matériaux dopés à l'ytterbium, un grand nombre de passages dans le milieu amplificateur est nécessaire et une structure d'amplification régénérative s'impose (Fig. 1-23b).

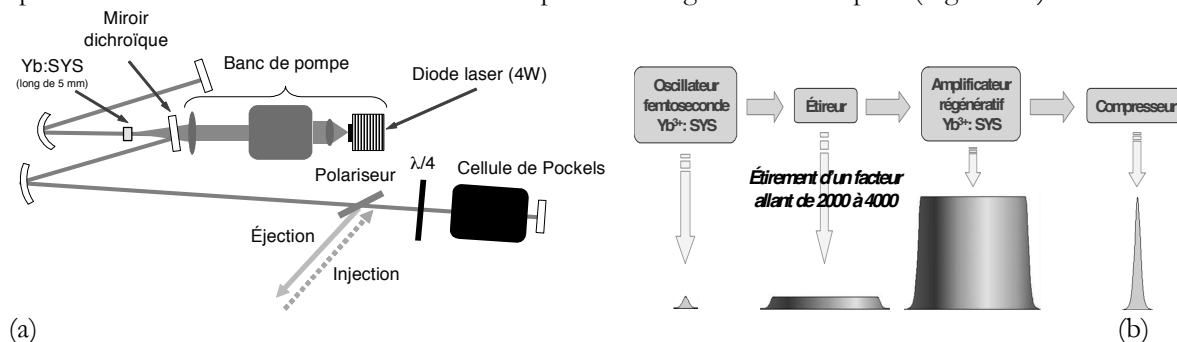


Figure 1-23a. Schéma de l'amplification par dérive de fréquence. b. Schéma expérimental de l'amplificateur régénératif.

Dans ce type de structure, nous avons obtenu des impulsions amplifiées de 100 μJ à 200 Hz, 70 μJ à 1 kHz et 40 μJ à 3 kHz, ce qui correspond à une efficacité optique-optique maximale de 3 %. Cette efficacité constitue un record pour un amplificateur à base d'un matériau dopé à l'Yb. Les impulsions les plus courtes obtenues en sortie de l'amplificateur ont une durée de 380 fs (Fig. 1-24).

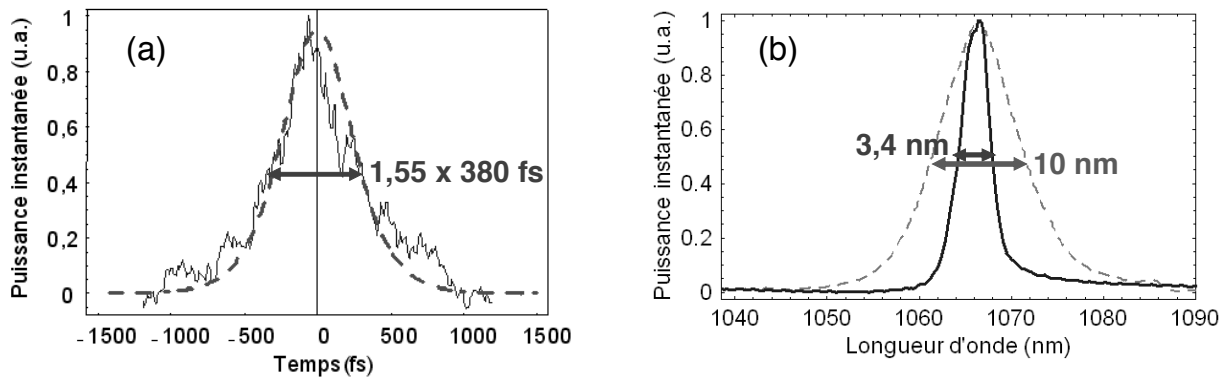


Figure 1-24. Autocorrélation (a) et spectre (b) des impulsions en sortie de l'amplificateur régénératif (pour visualiser le rétrécissement spectral par le gain le spectre des impulsions injectés est aussi représenté).

Cette durée était la plus courte jamais obtenue avec un cristal dopé à l'Yb. Cependant, aux regards des durées obtenues en sortie de l'oscillateur, on pouvait se demander pourquoi il existait un tel écart et s'il n'y avait pas un moyen d'y remédier.

Comme nous venons de le voir, les durées des impulsions issues de l'amplificateur à base d'Yb:SYS sont nettement supérieures à celles obtenues en sortie de l'oscillateur. Ceci peut s'expliquer par le gain faible inhérent aux matériaux dopés à l'ytterbium. En effet, l'intensité de saturation de ces matériaux est voisine du seuil de dommage. Cela impose de travailler avec des faisceaux suffisamment larges pour ne pas endommager le cristal, ce qui a comme conséquence délétère d'avoir un gain faible pour l'amplification. Il est donc nécessaire de faire un grand nombre d'allers et retours dans le milieu amplificateur pour extraire efficacement l'énergie. Ainsi, bien que le rétrécissement spectral par le gain à chaque passage soit faible, grâce aux spectres très larges de nos cristaux, on observe malgré tout un fort rétrécissement du spectre en sortie de l'amplificateur. Pour mieux maîtriser ce phénomène nous avons donc développé un code de simulation numérique.

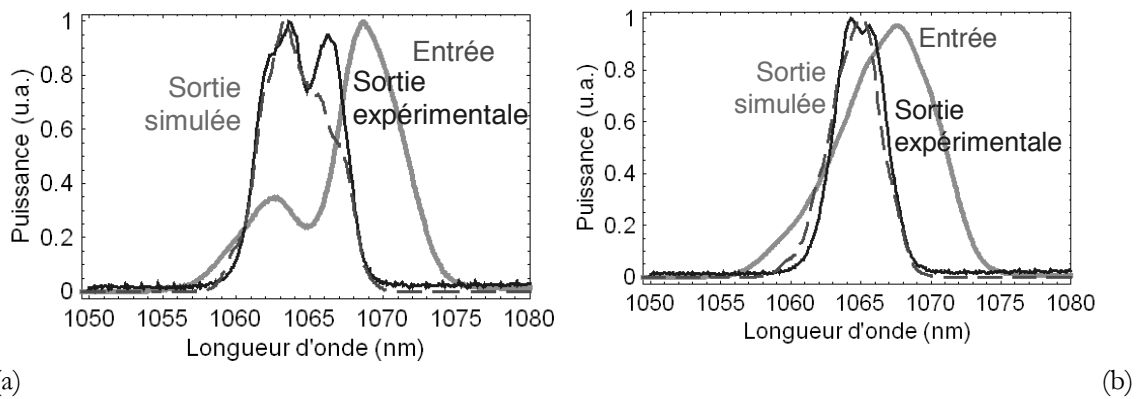


Figure 1-24a. Validation de la simulation. b. Elargissement spectral par creusement spectral de l'impulsion injectée (simulation et expérience).

Afin de refléter au mieux nos résultats expérimentaux, ces simulations prennent en compte les données spectroscopiques expérimentales du cristal utilisé et les profils expérimentaux des impulsions injectées. Afin de valider nos hypothèses de calculs, notamment celle sur l'homogénéité du gain, nous avons confronté les résultats expérimentaux aux simulations (fig. 1-24a). La simulation reproduit correctement l'expérience (ce qui ne serait pas le cas avec un gain inhomogène) ce qui valide nos hypothèses de départ. Après cette validation nous avons recherché les moyens de réduire l'influence du rétrécissement par le gain. Une des solutions que nous avons envisagée est de creuser le spectre de l'impulsion injectée (fig. 1-24b). Les simulations nous ont permis d'optimiser l'amplitude et la position de ce trou spectral et prédisent un élargissement de l'ordre de 6 nm. Nous avons donc réalisé l'expérience correspondante en utilisant un

modulateur acousto-optique programmable (Dazzler) pour creuser le spectre d'entrée. Les résultats expérimentaux sont à la hauteur de nos prévisions comme le montre la figure 1-24b avec un spectre élargi de 6,4 nm ce qui correspond à des impulsions sub-300-fs.

Nous avons donc développé un outil de prédiction efficace pour modéliser le rétrécissement spectral par le gain dans les matériaux dopés à l'ytterbium. Ce modèle peut prendre en compte n'importe quel cristal et s'avère extrêmement utile pour les développements futurs.

G. Synthèse

Nous avons donc dans un premier temps démontré la production de durée très brèves grâce aux Yb :BOYS et Yb :SYS à basse puissance. Puis grâce à des travaux préliminaires sur le comportement thermique des cristaux dopés à l'ytterbium à plus forte puissance nous avons aussi pu développer des lasers femtoseconde de forte puissance moyenne. Ces avancées sont résumées sur la figure 1-25.

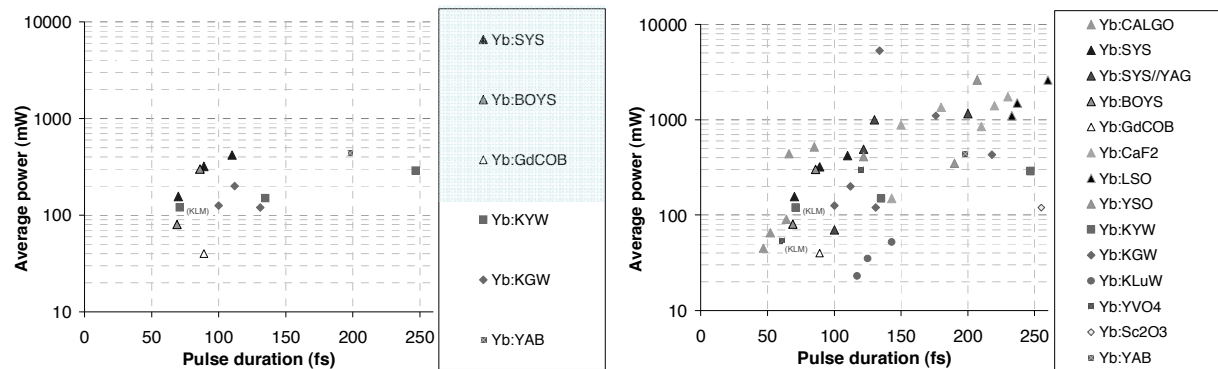


Figure 1-25. Figures de mérite (durée-puissance) représentant les différents résultats obtenus avec des oscillateurs à base de cristaux dopés à l'ytterbium en 2004 à gauche et en 2007 à droite. Les triangles représentent les travaux effectués au LCFIO.

5. Encadrement

Les travaux sur la thermique ont été effectués lors de la thèse Sébastien CHENAIS (thèse CNRS/DGA soutenue en décembre 2002). Les travaux sur le Yb :BOYS et Yb :SYS ont été réalisés dans le cadre de la thèse de Pierre Raybaut (soutenue en 2003). Les travaux sur le Yb :YSO et Yb :LSO ont été réalisés pour la partie thermique dans le cadre de la thèse de Mathieu Jacquemet et pour la partie femtoseconde dans le cadre de la thèse de Florent Thibault. Les travaux sur le Yb :CaF₂ ont été réalisés par Andrea Lucca. Le travail sur le Yb :CALGO a été effectué par Y. Zaouter lors de son stage de DEA et actuellement par J. Boudeile lors de sa thèse (2005-2008).

Sébastien Chénais	Doctorant	30 %	8 articles	2000-2002
Pierre Raybaut	Doctorant	80 %	6 articles	2000-2003
Mathieu Jacquemet	Doctorant	20 %	4 articles	2002-2005
Andrea Lucca	Doctorant Marie Curie	100 %	2 articles	Nov 2003- av 2004
Florent Thibault	Doctorant CEA LETI	20 %	1 article	2003-2006
Justine Boudeile	Doctorant	80 %	1 article	2005-...
Hugues Ntjam	stage de maitrise	100 %		Avril-juin 2003
Guillaume Debourg	d'ingenirie mathématique	100 %		Avril-juillet 2004
Yoann Zaouter	Stage DEA onde et matière	100 %		Avril-septembre 2005
	Stage Master	100 %	1 article	

6. Publication et communication

Articles

- a[12] S. Chénais, F. Druon, F. Balembois, G. Lucas-Leclin, P. Georges, A. Brun, M. Zavelani-Rossi, F. Augé, J.P. Chambaret, G. Aka, D. Vivien, "Multiwatt, tunable, diode-pumped CW Yb:GdCOB laser", **Applied Physics B** Vol. 72, 389-393 (2001)
- a[13] A. Aron, G. Aka, B. Viana, A. Kahn-Harari, D. Vivien, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, A. Brun, N. Lenain, M. Jacquet "Spectroscopic properties and laser performances of Yb:YCOB and potential of the Yb:LaCOB material", **Optical Materials**, 16, pp. 181-188 (2001).
- a[14] F. Druon, F. Balembois, P. Georges, A. Brun, S.-W. Bahk, J. Nees, G. Mourou, G. Chériaux, J.-P. Chambaret, G. Aka, D. Vivien, "12-mJ, 350-fs, Yb:GdCOB regenerative amplifier", **Optics Communication**, 199, 181-187 (2001)
- a[15] F. Druon, S. Chénais, P. Raybaut, F. Balembois, P. Georges, R. Gaumé, G. Aka, B. Viana, S. Mohr, D. Kopf, "Diode-pumped YbSr₂Y(BO₃)₃ femtosecond laser", **Optics Letters**, Vol. 27, 197-199, (2002)
- a[16] S. Chénais, F. Druon, F. Balembois, and P. Georges, R. Gaumé, P. H. Haumesser, B. Viana, G. P. Aka and D. Vivien, "Spectroscopy and efficient laser action under diode-pumping of a new broadly tunable crystal: Yb³⁺:Sr₂Y(BO₃)₃", **J. Opt. Soc. Am. B** Vol. 19, No 5, pp. 1083-1091, (2002)
- a[17] F. Druon, S. Chénais, F. Balembois, P. Georges, A. Brun, A. Courjaud, C. Hönninger, F. Salin, M. Zavelani-Rossi, F. Augé, J.P. Chambaret, "High power diode-pumped Yb:GdCOB laser: from continuous-wave to femtosecond regime", **Optical Material** vol.19, no.1 p.73-80, (2002)
- a[18] F. Druon, S. Chénais, P. Raybaut, F. Balembois, P. Georges, R. Gaumé, G. Aka, B. Viana, D. Vivien, J.P. Chambaret, S. Mohr, D. Kopf, "Largely tunable diode-pumped sub-100-fs Yb:BOYS laser", **Applied Physics B**, 74 SUPPL. S201-203 (2002)
- a[19] F. Druon, G.J. Valentine, S. Chénais, P. Raybaut, F. Balembois, P. Georges, A. Brun, A.J. Kemp, W. Sibbett, S. Mohr, D. Kopf, D.J.L. Birkin, D. Burns, A. Courjaud, C. Hönninger, F. Salin, R. Gaumé, A. Aron, G. Aka, B. Viana, C. Clerc, H. Bernas, "Diode-pumped femtosecond oscillator using ultra-broad Yb-doped crystals and modelocked using low-temperature grown or ion implanted saturable-absorber mirrors", **European Physical Journal** 20, 177-182 (2003)
- a[20] F. Druon, S. Chénais, P. Raybaut, F. Balembois, P. Georges, R. Gaumé, P.H. Haumesser, B. Viana, D. Vivien, S. Dhellemmes, V. Ortiz, C. Larat, "A new apatite-structure crystal: Yb³⁺:SrY₄(SiO₄)₃O, for the development of diode-pumped femtosecond lasers", **Optics Letters** Vol. 27, 1914-16, (2002)
- a[21] S. Chénais, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, A. Brenier, G. Boulon, "Diode-pumped Yb:GGG laser: comparison with Yb:YAG", **Optical Material** vol.22, p.99-106, (2003)
- a[22] S. Chénais, F. Druon, F. Balembois, G. Lucas-Leclin, Y. Fichot, P. Georges, R. Gaumé, B. Viana, G. P. Aka, D. Vivien, "Thermal lensing measurement in diode-pumped Yb-doped GdCOB, YCOB, YSO, YAG and KGW", **Optical Material** vol.22, p.129-137, (2003)
- a[25] M. Jacquemet, F. Balembois, S. Chénais, F. Druon, P. Georges, R. Gaumé and B. Ferrand "First diode-pumped Yb-doped solid-state laser continuously tunable between 1000 and 1010 nm" **Applied Physics B** Volume 78, Number 1 13-18 (2004)
- a[26] P. Raybaut, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, R. Gaumé, B. Viana, D. Vivien "Directly diode-pumped Yb³⁺:SrY₄(SiO₄)₃O regenerative amplifier" **Optics Letters** Vol. 28, 2195-97, (2003)
- a[27] F. Druon, F. Balembois and P. Georges, "Laser crystals for the production of ultra-short laser pulses", **Annales de Chimie Science des Matériaux**, Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS, Vol. 28, Issue 6, Pages 47-72 (2003)
- a[28] S. Chénais, S. Forget, F. Druon, F. Balembois and P. Georges, "Direct and absolute temperature mapping and heat transfer measurements in diode-end-pumped Yb:YAG," **Applied Physics B: Lasers and Optics** Volume 79, 221 - 224 (2004).
- a[30] S. Chénais, F. Balembois, F. Druon, G. Lucas-Leclin, P. Georges, "Thermal Lensing in Diode-Pumped Ytterbium Lasers - Part I: Theoretical analysis and wavefront measurements" **IEEE J. Quantum Electronics** Vol. 40 No 9 September, 1217-1234, 2004
- a[31] S. Chénais, F. Balembois, F. Druon, G. Lucas-Leclin, P. Georges, "Thermal Lensing in Diode-Pumped Ytterbium Lasers - Part II: evaluation of quantum efficiencies and thermo-optic coefficients." **IEEE J. Quantum Electronics** Vol. 40 No 9 September, 1235-1243, 2004
- a[32] A.Lucca, M. Jacquemet, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, P. Camy, J.L. Doualan, R. Moncorgé, "High power tunable diode-pumped Yb³⁺:CaF₂ laser," **Optics Letters** Vol. 29 1879-1881 (2004)
- a[33] P. Raybaut, F. Balembois, F. Druon, P. Georges, "Numerical and experimental study of gain narrowing in ytterbium-based regenerative amplifiers" **IEEE J. Quantum Electronics** Vol. 41 No 3 March, 415-425, 2005
- a[34] F. Druon, F. Balembois, and P. Georges, "Ultra-short-pulsed and highly-efficient diode-pumped Yb:SYS mode-locked oscillators," **Opt. Express** 12, 5005-5012 (2004), <http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=OPEX-12-20-5005>
- a[35] A.Lucca, G. Debourg, M. Jacquemet, F. Druon, F. Balembois, and P. Georges P. Camy, J.L. Doualan, R. Moncorgé, "High-power diode-pumped Yb³⁺:CaF₂ femtosecond laser," **Optics Letters** Vol. 29 2767-2769 (2004)
- a[36] A. Major, J.S. Aitchison, P.W.E. Smith, F. Druon, P. Georges, G. Aka, B. Viana, "Z-scan measurements of non-linear refractive indices of novel Yb-doped laser crystal host", **Applied Physics B**, 80, 199-201 (2005)
- a[37] M. Jacquemet, C. Jacquemet, N. Janel, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, J. Petit, B. Viana, D. Vivien, and B. Ferrand "Efficient laser action of Yb:LSO and Yb:YSO oxyorthosilicates crystals under high-power diode-pumping," **Applied Physics B**, 80, 171-176 (2005)
- a[38] M. Jacquemet, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, and B. Ferrand, "Blue-green single-frequency laser based on intracavity frequency doubling of a diode-pumped ytterbium-doped laser," **Opt. Express** 13, 2345-2350 (2005), <http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=OPEX-13-7-2345>
- a[39] F. Druon, S. Chénais, F. Balembois, P. Georges, R. Gaumé, B. Viana, "Diode-pumped continuous-wave and femtosecond laser operations of a heterocomposite crystal Yb³⁺:SrY₄(SiO₄)₃O | Y₃Al₅O₁₂," **Optics Letters**, Vol. 30, Issue 8, 857-859 (2005)
- a[41] Y. Zaouter, J. Didierjean, F. Balembois, G. Lucas Leclin, F. Druon, P. Georges, J. Petit, P. Goldner and B. Viana "47-fs diode-pumped Yb³⁺:CaGdAlO₄ laser," **Optics Letters** Vol. 31, 119-121 (2006)
- a[43] F. Thibault, D. Pelenc, F. Druon, Y. Zaouter, M. Jacquemet, and P. Georges, "Efficient diode-pumped Yb³⁺:Y₂SiO₅ and Yb³⁺:Lu₂SiO₅ high-power femtosecond laser operation," **Optics Letters** 31, 1555-1557 (2006)
- a[45] M. Jacquemet, F. Druon, F. Balembois, P. Georges "Single-frequency operation of diode-pumped Yb:KYW at 1003.4 nm and 501.7 nm by intracavity second harmonic generation," **Applied Physics B**, 85, 69-72 (2006)
- a[47] F. Druon, F. Balembois, P. Georges, "New laser crystals for the generation of ultra-short pulses", Article invité, **Compte Rendu de l'Académie des Sciences**, Advanced Crystal Optics Special Issue of Boulanger
- a[48] S. Chénais, F. Druon, S. Forget, F. Balembois, P. Georges, "On thermal effects in solid-state lasers: the case of ytterbium-doped materials", invited paper in **Progress in Quantum Electronics** 30 89-153 (2006)
- a[50] J. Boudeille, F. Druon, M. Hanna, P. Georges, Y. Zaouter, E. Cormier, J. Petit, P. Goldner, and B. Viana, "Continuous-wave and femtosecond laser operation of Yb:CaGdAlO₄ under high-power diode pumping," **Opt. Lett.** 32, 1962-1964 (2007)

Chapitre d'ouvrage

- b[2] F. Druon, "sources femtosecondes pompées par diodes" **Lasers et Technologies Femtosecondes**, Publication de l'Université de Saint Etienne 2005

Conférences invitées

- ci[1] S. Chénais, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, A. Brun, F. Mougél, G. Aka, D. Vivien, "High power diode-pumped CW Yb:GdCOB laser", **Invited conference in International Workshop on Optics and Spectroscopy**, SPIE, April 2000, Hanoi, Vietnam
- ci[2] F. Druon, F. Balembois, P. Georges, R. Gaumé, G. Aka, B. Viana, D. Vivien, "Diode pumped femtosecond oscillators based on new ytterbium doped borates crystals", **Invited conference at Photonics North 2002**, June 2002, Québec, Canada, Application of photonic technology, R. A. Lessard, G. A. Lampropoulos, G. W. Schinn, SPIE vol. 4833 p. 906.
- ci[3] F. Druon, P. Raybaut, F. Balembois, P. Georges, R. Gaumé, G. Aka, B. Viana, D. Vivien, "Development of diode pumped femtosecond lasers based on new ytterbium doped crystals" **Invited conference at 5th French-Israeli Workshop on OPTICAL PROPERTIES of INORGANIC MATERIALS** Lyon (Décembre 2002)

- ci[5] F. Druon, P. Raybaut, F. Balembois, P. Georges, R. Gaumé, G. Aka, B. Viana, D. Vivien, "Development of diode pumped femtosecond lasers based on new ytterbium doped crystals" **Conférence Invitée** – 12th International Laser Physics Workshop (LPHYS'03), Hambourg (25-29 Aout 2003)
- ci[6] F. Druon, P. Raybaut, F. Balembois, P. Georges, A. Brun, R. Gaumé, G. Aka, B. Viana, D. Vivien, "Diode pumped femtosecond lasers based on new ytterbium doped crystals" **Conférence Invitée** – Russian-French Laser Symposium **RFLS-2003**, Moscou (20-23 Octobre 2003)
- ci[7] P. Georges, F. Druon, P. Raybaut, F. Balembois, R. Gaumé, G. Aka, B. Viana, D. Vivien, "Les nouveaux cristaux dopés à l'ytterbium vont-ils révolutionner la technologie des lasers femtoseconde ?" **Conférence Invitée** – **JPU 2003** - 6^{èmes} journées des phénomènes ultra-rapides, Mittelwahr (22-24 octobre 2003)
- ci[8] P. Raybaut, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, R. Gaumé, G. Aka, B. Viana, "Directly diode-pumped oscillators and regenerative amplifiers for ultra-short pulse generation", **Conférence Invitée** – Conference on Laser and Electro-Optic (**CLEO 2004**), San Fransisco (22-27 May 2004)
- ci[9] B. Viana, J. Petit, R. Gaumé, P. Goldner, D. Vivien, F. Druon, P. Raybaut, F. Balembois, P. Georges, "Yb-doped laser materials for high power ultrafast applications" **Conférence Invitée** – **Photonics Europe** - Solid State Lasers, Strasbourg (26-30 Avril 2004) Publication des actes dans SPIE Volume 5460
- ci[11] F. Balembois, M. Jacquemet, A. Lucca, P. Raybaut, F. Druon, P. Georges, G. Aka, B. Viana, Bernard Ferrand, P. Camy, J.L. Doualan, R. Moncorgé, "New Yb-doped solid state laser materials for high power and femtosecond lasers" **Conférence Invitée EPS Europhoton conference** – Lausanne (29 august – 3 sept 2004)
- ci[13] Y. Zaouter, J. Didierjean, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, J. Petit, B. Viana and P. Goldner, "47 fs in diode-pumped Yb₃+:CaGdAlO₄" **Conférence Invitée** : **Photonics Europe**, Strasbourg (Avril 2006), Publication des actes dans : Proceedings of SPIE Vol. 6190 Solid State Lasers and Amplifiers II
- ci[14] F. Druon, J. Boudeile, Y. Zaouter, M. Hanna, F. Balembois, P. Georges, J. Petit, P. Goldner and B. Viana, "New Yb-doped crystals for high power and ultrashort lasers" **Conférence Invitée** congrès **SPIE Optics for Sececurity and Défense** Stockholm (Septembre 2006)

Conférences avec publications d'actes

- ca[9] F. Druon, F. Balembois, P. Georges, A. Brun, G. Aka, D. Vivien, S.W. Bahk, J. Nees, G. Mourou, G. Chériaux, J.P. Chambaret, "12-mJ, 350-fs, Yb:GdCOB regenerative amplifier", **Advanced Solid State Lasers 2001**, january 2001 Seattle, Washington.
- ca[10] F. Druon, S. Chénais, P. Raybaut, F. Balembois, P. Georges, R. Gaumé, G. Aka, B. Viana, D. Vivien, J.P. Chambaret, S. Mohr, D. Kopf, "Largely-tunable diode-pumped sub-100-fs Yb:BOYS laser", Post-deadline paper **Ultrafast Optics**, July 2001, Québec, Canada.
- ca[11] F. Druon, S. Chénais, P. Raybaut, F. Balembois, P. Georges, R. Gaumé, G. Aka, B. Viana, D. Vivien, S. Mohr, D. Kopf, "CW and femtosecond regime of a new very broadband Yb-doped BOYS crystal", **Advanced Solid State Lasers 2002**, february 2002, Québec, Canada.
- ca[12] F. Druon, F. Balembois, P. Georges, R. Gaumé, G. Aka, B. Viana, D. Vivien, "Diode pumped femtosecond oscillators based on new ytterbium doped borates crystals", **Invited conference at Photonics North 2002**, june 2002, Québec, Canada, Application of photonic technology, R. A. Lessard, G. A. Lampropoulos, G. W. Schinn, SPIE vol. 4833 p. 906.
- ca[13] F. Druon, P. Raybaut, F. Balembois, P. Georges, R. Gaumé, G. Aka, B. Viana, D. Vivien, "Development of diode pumped femtosecond lasers based on new ytterbium doped crystals" **Invited conference at 5th French-Israeli Workshop on OPTICAL PROPERTIES of INORGANIC MATERIALS** Lyon (Décembre 2002)
- ca[15] P. Raybaut, F. Druon, S. Chénais, F. Balembois, P. Georges, R. Gaumé, B. Viana, D. Vivien, S. Dhellemmes, V. Ortiz, C. Larat, "Diode-pumped 100-fs lasers based on a new apatite-structure crystal : Yb³⁺:SrY₄(SiO₄)₃O", **Advanced Solid State Photonics 2003**, 2-5 february 2003, San Antonio, USA. Publié dans : OSA Trends in Optics and Photonics Vol. 83, *Advanced Solid State Lasers*, John Zaybowski, ed. (Optical Society of America, Washington, DC 2003), pp. 170-174.
- ca[16] M. Jacquemet, F. Balembois, S. Chénais, F. Druon, P. Georges, R. Gaumé, B. Viana and D. Vivien, B. Ferrand, "CW Yb:YSO diode pumped laser emitting at 1003.4 nm for the realization of a stable frequency standard", **Advanced Solid State Photonics 2003**, 2-5 february 2003, San Antonio, USA. Publié dans : OSA Trends in Optics and Photonics Vol. 83, *Advanced Solid State Lasers*, John Zaybowski, ed. (Optical Society of America, Washington, DC 2003), pp. 184-188.
- ca[18] M. Jacquemet, A. Lucca, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, P. Camy, J.L. Doualan, R. Moncorgé, "High power CW diode-pumped laser operation of Yb³⁺:CaF₂ crystal" **Photonics Europe**, Solid State Lasers Strasbourg (26-30 Avril 2004), Conf orale, actes SPIE Volume 5460
- ca[19] B. Viana, J. Petit, R. Gaumé, P. Goldner, D. Vivien, F. Druon, P. Raybaut, F. Balembois, P. Georges, "Yb-doped laser materials for high power ultrafast applications" **Conférence Invitée** – **Photonics Europe** - Solid State Lasers, Strasbourg (Avril 2004) Publication des actes dans SPIE Volume 5460
- ca[20] M. Jacquemet, F. Balembois, F. Druon, P. Georges and B. Ferrand "Single-mode operation at 1003.4 nm with Yb:YSO" **Advanced Solid State Photonics**, Topical Meeting Santa Fé (1-4 February 2004) Conf orale, Publication en cours
- ca[21] S. Forget, S. chénais, F. Druon, F. Balembois, P. Georges "Heat transfer measurements and high resolution absolute temperature mapping in diode-end-pumped Yb:YAG" **Advanced Solid State Photonics**, Topical Meeting Santa Fé (1-4 February 2004) Publication en cours
- ca[23] M. Jacquemet, F. Balembois, F. Druon, P. Georges and B. Ferrand, "Single-frequency operation at 1003.4 nm with Yb:YSO" **Conférence Orale** : **Photonics West 2005**, San José USA (Janvier 2005) Publications des actes dans : Solid State Lasers XIV: Technology and Devices edited by Hanna J. Hoffman, Ramesh K. Shori, Proceedings SPIE Vol. 5707 (SPIE, Bellingham, WA, 2005) 279-286
- ca[24] Julien Didierjean, Sébastien Forget, Sébastien Chénais, Frédéric Druon, François Balembois, Patrick Georges, Konrad Altmann, Christoph Pflaum "High resolution absolute temperature mapping in laser crystals in diode-end-pumped configuration" Poster, **Photonics West 2005**, San José USA (Janvier 2005) Publications des actes dans : Proceedings of SPIE -- Volume 5707 Solid State Lasers XIV: Technology and Devices, Hanna J. Hoffman, Ramesh K. Shori, Editors, April 2005, pp. 370-379
- ca[25] F. Druon, A. Lucca, F. Balembois, P. Georges, P. Camy, V. Petit, J. L. Doualan, R. Moncorgé, "Diode pumped cw and fs laser based on Yb:CaF₂", **Photonics West 2005**, San José USA (Janvier 2005) Publications des actes dans : Proceedings of SPIE -- Volume 5714 Commercial and Biomedical Applications of Ultrafast Lasers V, Joseph Neev, Christopher B. Schaffer, Andreas Ostendorf, Stefan Nolte, Editors, March 2005, pp. 186-194
- ca[26] F. Druon, F. Balembois, P. Georges, R. Gaumé, B. Viana, "135-fs diode-pumped laser with 1-W average power based on a YAG//Yb:SYS hetero-bonded crystal", **Advanced Solid State Photonics (ASSP)** (février 2005)
- ca[27] A. Lucca, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, P. Camy, V. Petit, J. L. Doualan, R. Moncorgé, "Yb:CaF₂ femtosecond laser", **Advanced Solid State Photonics (ASSP)** (février 2005)
- ca[28] M. Jacquemet, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, J. Petit, B. Viana, P. Goldner, B. Ferrand, "Efficient laser operation with Yb-doped silicates under diode-pumping", **Advanced Solid State Photonics (ASSP)** (février 2005)
- ca[31] Y. Zaouter, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, J. Petit, P. Goldner, B. Viana, "Génération d'impulsions femtoseconde à partir d'un cristal d'Yb₃+:CaGdAlO₄" Poster : **COLOQ 9**, Dijon, Septembre 2005
- ca[33] J. Petit, P. Goldner, B. Viana J. Didierjean, F. Balembois, F. Druon, P. Georges, "Quest of athermal solid state laser : case of Yb:CaGdAlO₄", **Conférence orale** : **Advanced Solid State Photonics (ASSP)** (Lake Tahoe, février 2006) Publications des actes en cours
- ca[34] Y. Zaouter, J. Didierjean, G. Lucas-Leclin, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, J. Petit, P. Goldner and B. Viana, "Diode Pumped Yb:CaGdAlO₄ Femtosecond Laser", **Conférence orale** : **Advanced Solid State Photonics (ASSP)** (Lake Tahoe, février 2006) Publications des actes en cours
- ca[36] J. Petit, P. Goldner, B. Viana J. Didierjean, F. Balembois, F. Druon, P. Georges, "Quest of athermal solid state laser : case of Yb:CaGdAlO₄" **Conférence orale** : **Photonics Europe**, Strasbourg (Avril 2006) Publication des actes dans : Proceedings of SPIE Vol. 6190 Solid State Lasers and Amplifiers II

- ca[37] J. Didierjean, F. Balembois, F. Druon, P. Georges, J. Petit, P. Goldner, B. Viana, "Temperature measurements on Nd doped vanadate crystals : bulk crystals (Nd:GdVO₄ and Nd:YVO₄) and composite rods" Poster : **Photonics Europe**, Strasbourg (Avril 2006) Publications des actes dans : Proceedings SPIE Vol 6184, Semiconductor Lasers and Laser Dynamics II
- ca[38] Y. Zaouter, J. Didierjean, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, J. Petit, B. Viana and P. Goldner, "47 fs in diode-pumped Yb³⁺:CaGdAlO₄" Conférence Invitée : **Photonics Europe**, Strasbourg (Avril 2006), Publication des actes dans : Proceedings of SPIE Vol. 6190 Solid State Lasers and Amplifiers II
- ca[39] F. Druon, J. Boudeile, Y. Zaouter, M. Hanna, F. Balembois, P. Georges, J. Petit, P. Goldner and B. Viana, "New Yb-doped crystals for high power and ultrashort lasers" Conférence Invitée congrès **SPIE Optics for Secrecity and Défense** Stockholm (Septembre 2006)
- ca[40] Justine Boudeile, Y. Zaouter, Frederic Druon, Marc Hanna, Patrick Georges, Johan Petit, Philippe Goldner, Bruno Viana, "Generation of 66-fs 440 mW Average Power Pulses from a Diode Pumped Yb³⁺:CaGdAlO₄ Laser", **Advanced Solid State Photonics** (ASSP), January 28-31, 2007, Vancouver (Canada)

Conférences sans publications d'actes

- c[16] S.W. Bahk, J. Nees, G. Mourou, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, A. Brun, G. Aka, D. Vivien, G. Chériaux, J.P. Chambaret, "Yb:GdCOB regenerative amplifier", **CLEO 2001**, Baltimore, US, May 2001
- c[17] S. Chénais, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, A. Brun, R. Gaumé, P.H. Haumesser, G. Aka, D. Vivien, "Diode-pumped laser action in a new broadly tunable crystal : Yb³⁺:Sr₃Y(BO₃)₃", **CLEO 2001**, Baltimore, US, May 2001
- c[18] S. Chénais, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, A. Brun, A. Brenier, G. Boulon, "Diode-pumped operation of Yb:GGG laser", **CLEO 2001**, Baltimore, US, May 2001
- c[19] F. Druon, S. Chénais, P. Raybaut, F. Balembois, P. Georges, R. Gaumé, A. Aron, G. Aka, B. Viana, D. Vivien, A. Courjaud, C. Hönninger, F. Salin, "Oscillateurs laser femtosecondes à base de cristaux de borates inédits dopés aux ions ytterbium", **COLOQ 2001**, Rennes France, 5-7 sept 2001
- c[20] F. Druon, P. Raybaut, S. Chénais, F. Balembois, P. Georges, S. Mohr, D. Kopf, R. Gaumé, G. Aka, B. Viana, D. Vivien, "69-fs and broadly-tunable diode-pumped Yb:BOYS laser", **CLEO 2002**, Long Beach CA, US, May 2002
- c[21] S. Chénais, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, A. R. Gaumé, B. Viana, G. P. Aka, D. Vivien, "Evidence of nonradiative processes in Yb-doped oxoborate crystals by thermal lensing measurements", **CLEO 2002**, Long Beach CA, US, May 2002
- c[22] V. Ortiz, F. Druon, A. Alexandrou, "GaAs épitaxié à basse température: modélisation de la photoréflexivité résolue en temps", Journées Nationales Microélectronique et Optoélectronique **JNMN 2002**, St Aygulf, septembre 2002
- c[25] P. Raybaut, F. Druon, S. Chénais, F. Balembois, P. Georges, S. Dhellemmes, V. Ortiz, C. Larat, R. Gaumé, B. Viana, D. Vivien, "Directly diode-pumped Yb³⁺:SrY₄(SiO₄)₃O 100-fs lasers", **CLEO 2003**, Baltimore, US, 1-6 June 2003
- c[27] M. Jacquemet, P. Raybaut, F. Balembois, S. Chénais, F. Druon, P. Georges, R. Gaumé, B. Viana, D. Vivien, B. Ferrand, "CW diode pumped Yb:YSO laser for the development of a stable standard of optical frequencies", **CLEO 2003**, Baltimore, US, 1-6 June 2003
- c[28] S. Chénais, F. Balembois, F. Druon, P. Georges, R. Gaumé, B. Viana, G. P. Aka, D. Vivien, "Multiwatt and broadly tunable laser action from diode-pumping of two silicate ytterbium-doped crystals: Yb:Y₂SiO₅ and Yb:SrY₄(SiO₄)₃O", **CLEO-Europe 2003**, Munich, Germany, 22-27 June 2003
- c[30] P. Raybaut, F. Druon, S. Chénais, F. Balembois, P. Georges, S. Dhellemmes, V. Ortiz, C. Larat, R. Gaumé, B. Viana, D. Vivien, "Diode-pumped 100-fs lasers based on a new apatite-structure crystal: Yb³⁺:SrY₄(SiO₄)₃O", **CLEO-Europe 2003**, Munich, Germany, 22-27 June 2003
- c[31] S. Chénais, F. Balembois, F. Druon, G. Lucas-Leclin, P. Georges, "Quantum efficiency measurements in Yb-doped crystals using an optical method", **CLEO-Europe 2003**, Munich, Germany, 22-27 June 2003
- c[32] F. Druon, P. Georges, "Stability of soliton regimes near bifurcation in passively modelocked high gain Yb-doped femtosecond lasers", **CLEO-Europe 2003**, Munich, Germany, June 2003
- c[33] M. Jacquemet, F. Balembois, S. Chénais, F. Druon, P. Georges, R. Gaumé, B. Viana, D. Vivien, B. Ferrand, "CW Yb:YSO diode pumped laser emitting at 1003.4 nm for the development of a stable frequency standard", **CLEO-Europe 2003**, Munich, Germany, 22-27 June 2003
- c[34] V. Ortiz, J. Nagle, S. Dhellemmes, Ch. Larat, F. Druon, P. Georges, A. Alexandrou, "Study of low-temperature-grown (In)GaAs: application to the realization of Semiconductor Saturable Absorber Mirrors" **CLEO-Europe 2003**, Munich, Germany, 22-27 June 2003
- c[38] S. Forget, S. Chénais, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, "Méthodes de caractérisation des effets thermiques dans les cristaux lasers : lentille thermique et température absolue" Journées Nationales des Cristaux pour l'Optique, **JNCO 2003**, Lyon-Ecully (69) (5-7 Novembre 2003)
- c[39] M. Jacquemet, F. Balembois, F. Druon, P. Georges, R. Gaumé, B. Viana, D. Vivien, B. Ferrand, "Laser Yb:YSO, pompé par diode, continu et accordable dans la plage 1000-1010 nm, pour la définition d'un étalon secondaire de fréquences", Journées Nationales des Cristaux pour l'Optique, **JNCO 2003**, Lyon-Ecully (69) (5-7 Novembre 2003)
- c[40] F. Druon, P. Raybaut, F. Balembois, P. Georges, R. Gaumé, G. Aka, B. Viana, D. Vivien, "Development of diode pumped femtosecond lasers based on new ytterbium doped crystals" **Conférence Invitée – 12th International Laser Physics Workshop (LPHYS'03)**, Hambourg (Aout 2003)
- c[42] F. Druon, P. Raybaut, F. Balembois, P. Georges, A. Brun, R. Gaumé, G. Aka, B. Viana, D. Vivien, "Diode pumped femtosecond lasers based on new ytterbium doped crystals" **Conférence Invitée – Russian-French Laser Symposium RFLS-2003**, Moscou (Octobre 2003)
- c[43] P. Georges, F. Druon, P. Raybaut, F. Balembois, R. Gaumé, G. Aka, B. Viana, D. Vivien, "Les nouveaux cristaux dopés à l'ytterbium vont-ils révolutionner la technologie des lasers femtoseconde ?" **Conférence Invitée – JPU 2003 – 6^{èmes} journées des phénomènes ultra-rapides**, Mittelwahr (22-24 octobre 2003)
- c[44] P. Raybaut, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, R. Gaumé, G. Aka, B. Viana, "Directly diode-pumped oscillators and regenerative amplifiers for ultra-short pulse generation", **Conférence Invitée – Conference on Laser and Electro-Optic (CLEO 2004)**, San Francisco (May 2004)
- c[46] F. Balembois, M. Jacquemet, A. Lucca, P. Raybaut, F. Druon, P. Georges, G. Aka, B. Viana, Bernard Ferrand, P. Camy, J.L. Doualan, R. Moncorgé, "New Yb-doped solid state laser materials for high power and femtosecond lasers" **Conférence Invitée EPS Europhoton conference – Lausanne** (29 august – 3 sept 2004)
- c[47] M. Jacquemet, F. Balembois, F. Druon, P. Georges, B. Ferrand, "Yb:YSO diode-pumped single-mode laser at 1003.4 nm", Conference on Laser and Electro-Optic (**CLEO 04**), San Francisco (22-27 May 2004)
- c[48] S. Forget, S. Chénais, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, "High resolution absolute temperature mapping in diode-end-pumped Yb:YAG and heat transfer measurements" Conference on Laser and Electro-Optic (CLEO), San Francisco (22-27 May 2004)
- c[49] A. Major, J. S. Aitchison and P. W. E. Smith, F. Druon, P. Georges, B. Viana, G. P. Aka "Z-scan measurements of the nonlinear refractive indices of novel Yb-doped laser crystal hosts" Conference on Laser and Electro-Optic (**CLEO 04**), San Francisco (22-27 May 2004)
- c[51] A. Lucca, F. Druon, M. Jacquemet, F. Balembois, P. Georges, P. Camy, J.L. Doualan, R. Moncorgé "First demonstration of diode-pumped cw and femtosecond Yb³⁺:CaF₂ lasers" **Post-deadline Conference on Laser and Electro-Optic** (22-27 **CLEO 04**), San Francisco (May 2004)
- c[52] F. Druon, S. Chénais, F. Balembois, P. Georges, R. Gaumé, B. Viana, "New hetero-bonding crystal YAG||SYS:Yb, from the cw to the fs diode-pumped laser operation", **Conference on Laser and Electro-Optic** (CLEO), Baltimore (May 2005)
- c[53] F. Thibault, D. Pelenc, F. Druon, M. Jacquemet, F. Balembois, P. Georges, "Very efficient diode-pumped Yb³⁺:Y₂SiO₅ and Yb³⁺:Lu₂SiO₅ femtosecond laser", **Conference on Laser and Electro-Optic** (CLEO), Baltimore (May 2005)
- c[54] F. Thibault, D. Pelenc, F. Druon, M. Jacquemet, F. Balembois, P. Georges, "High power diode pumped femtosecond laser based on Ytterbium doped YSO and LSO crystals", **CLEO Europe**, Munich (June 2005)
- c[55] Y. Zaouter, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, J. Petit, P. Goldner and B. Viana "Génération d'impulsions femtoseconde à partir d'un cristal d'Yb³⁺:CaGdAlO₄", Poster : **Horizons de l'Optique**, Chambéry, Novembre 2005
- c[56] V. Petit, P. Camy, J. L. Doualan, R. Moncorgé, A. Lucca, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, "CaF₂:Yb³⁺, étude spectroscopique et fonctionnement laser accordable et à impulsions courtes", Conférence orale: **Journées Nationales des Cristaux pour l'Optique** (JNCO) Valpré-Ecully (12-14 déc. 2005)

- c[57] J. Petit, P. Goldner, B. Viana, Y. Zaouter, J. Ddidierjean, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, "CaGdAlO₄:Yb³⁺, matériau laser pour la puissance et la génération d'impulsions courtes", Conférence orale: **Journées Nationales des Cristaux pour l'Optique** (JNCO) Valpré-Ecully (12-14 déc. 2005)
- c[58] F. Thibault, D. Pelenc, M. Couchaud, B. Chambaz, B. Ferrand, F. Druon, Y. Zaouter, M. Jacquemet, P. Georges, "Laser de forte puissance et production d'impulsions femtosecondes dans des cristaux d'YSO et LSO dopés ytterbium. Croissance de couches minces pour application laser", Conférence orale: **Journées Nationales des Cristaux pour l'Optique** (JNCO) Valpré-Ecully (12-14 déc. 2005)
- c[61] F. Druon, P. Georges, S. Lebrun, P. Delaye, "Non-linear effects in microstructured optical fibers", **Indo-French young scientists meeting on Laser Physics and Quantum Optics** organized by the Indo-French Centre for the Promotion of Advanced Research (IFCPAR-CEFIPRA), Bangalore, India, January 4-8, 2006
- c[63] J. Boudeile, Y. Zaouter, M. Hanna, F. Balembois, F. Druon, P. Georges, J. Petit, P. Goldner, B. Viana, "Yb³⁺:CaGdAlO₄ crystal for 47-fs-pulsed diode-pumped laser", Oral : **Conference on Laser and Electro-Optic** (CLEO), Long Beach (May 2006)
- c[64] J. Boudeile, F. Druon, M. Hanna, P. Georges, J. Petit, P. Goldner, B. Viana, "530 mW average power 76-fs diode pumped Yb³⁺:CaGdAlO₄ laser", Conférence orale : **Europhotons** (Pise) (10-15 sept 2006)
- c[65] J. Boudeile, F. Druon, M. Hanna, P. Georges, J. Petit, P. Goldner, B. Viana, "530 mW average power 76-fs diode pumped Yb³⁺:CaGdAlO₄ laser", Poster : **EOS Meeting**, Paris (Octobre 2006)
- c[74] J. Boudeile, F. Druon, M. Hanna, P. Georges, Y. Zaouter, J. Petit, P. Goldner and B. Viana "68-fs passively mode-locked diode-pumped Yb³⁺:CaGdAlO₄ laser with an average power of 520 mW" **CLEO/Europe 2007**, 17-22 June 2007 Munich, Germany.
- c[75] Y. Zaouter, M. Hanna, F. Druon, E. Cormier, P. Georges "Third-order spectral phase compensation in parabolic pulse compression" **CLEO/Europe 2007**, 17-22 June 2007 Munich, Germany.

Diffusion de l'information scientifique

- d[1] Opto&Laser Europe, p 15, Juillet 2000. "Ytterbium-doped crystals "ideal" for ultrafast generation".
- d[2] Opto&Laser Europe, p 14, Février 2002. "Ytterbium source extends the ultrashort-pulse regime".

Effets non-linéaires et amplification dans les fibres en régime femtoseconde

1. Introduction

Le développement de nouvelles sources femtoseconde nous a permis d'obtenir de bonnes performances. Cependant, pour certaines applications il est nécessaire d'étendre leurs gammes de fonctionnement soit en générant de nouvelles longueurs d'onde soit en raccourcissant la durée des impulsions. Pour cela l'utilisation d'effets non-linéaires dans des fibres optiques paraît particulièrement adaptée. Ainsi, pour obtenir ces améliorations, nous nous sommes tout d'abord intéressés à l'utilisation de nouvelles fibres microstructurées (Microstructured Optical Fibres : MOF) dites fibres à cristal photonique qui ont des propriétés de dispersion particulière. En effet, ces nouvelles fibres, développées au début des années 2000, ont révolutionné l'optique femtoseconde dans le domaine du visible et de proche infrarouge grâce à leurs propriétés atypiques. D'autre part, nous avons aussi travaillé sur des amplificateurs intégrant gain et effets non-linéaires pour l'amplification en régime ultracourt. Dans ce dernier cadre, nous avons essayé de tirer profit des propriétés particulières des fibres (effets non-linéaire, fort gain et grande longueur d'interaction) pour développer des amplificateurs à la fois efficace et qui conserve voire qui réduise la durées des impulsions.

2. Cadre d'étude et collaborations

Les travaux sur la compression d'impulsions femtoseconde dans les fibres à cristal photonique s'est faite en collaboration avec la société danoise Crystal Fibre.

Enfin, les travaux sur l'amplification d'impulsions ultrabrèves dans des fibres dopées ytterbium se fait dans le cadre du financement ANR HiPoLYFF (High Power Lasers based on Ytterbium-doped Fibres in Femtosecond regime) depuis 2006 avec comme partenaires : le laboratoire Xlim de Limoges, le LOA/ENSTA de Palaiseau, l'Observatoire de la Côte d'Azur de Nice. Nous travaillons aussi en collaboration avec la société Amplitude Systèmes et le CELIA avec un soutien financier du Réseau des Technologies Femtosecondes.

3. Buts des travaux

Nous avons travaillé sur l'utilisation de fibres pour améliorer les performances de nos oscillateurs femtoseconde. Nous avons étudié trois types d'améliorations différentes 1 : le décalage de la longueur d'onde centrale des impulsions femtoseconde principalement en utilisant l'auto-décalage Raman, 2 : la compression d'impulsions pour accéder à des impulsions encore plus brèves en utilisant l'élargissement spectrale par automodulation de phase, 3 : l'amplification d'impulsion dans des fibres dopées ytterbium associé à la compression d'impulsions en régime d'amplification parabolique.

4. Principaux résultats

A. *Fibres à cristal photoniques*

a. *Autocompression et source accordable par décalage Raman*

L'intérêt porté aux fibres microstructurées (ou fibres à cristaux photoniques : PCF) ne cesse de croître notamment en raison de leurs exceptionnelles propriétés de dispersion. Ces fibres ont permis de réaliser un véritable saut technologique dans le domaine des effets non-linéaires impliquant des lasers à impulsions ultra-brèves et émettant dans le proche infrarouge. En effet, cette nouvelle génération de fibres peut présenter une dispersion de vitesse de groupe négative aux longueurs d'onde sub-microniques. Ceci autorise alors la propagation d'impulsions femtoseconde solitoniques dans le proche infrarouge, là où existent les lasers femtoseconde les plus efficaces. Nous avons donc utilisé des fibres microstructurées pour améliorer

les performances de nos oscillateurs femtoseconde, à la fois en ce qui concerne la durée de leurs impulsions et leur accordabilité spectrale.

Le dispositif expérimental que nous avons utilisé est très simple : un oscillateur laser émettant des impulsions de 110 fs à 1 μm est injecté dans une fibre microstructurée de 1 m à dispersion négative autour de 1 μm (typiquement $|D| \approx 20$ ps/nm/km). Nous avons montré qu'il était possible, en fonction de la puissance couplée dans la fibre, d'obtenir en sortie soit de l'autocompression d'impulsions, soit une source accordable, soit la génération d'un continuum de lumière.

Ainsi, à très basse puissance, nous avons montré que les impulsions en sortie de la fibre ont une durée plus courte qu'en entrée, comme le montre la figure 2-1. Nous avons obtenu une compression de 109 fs à 75 fs.

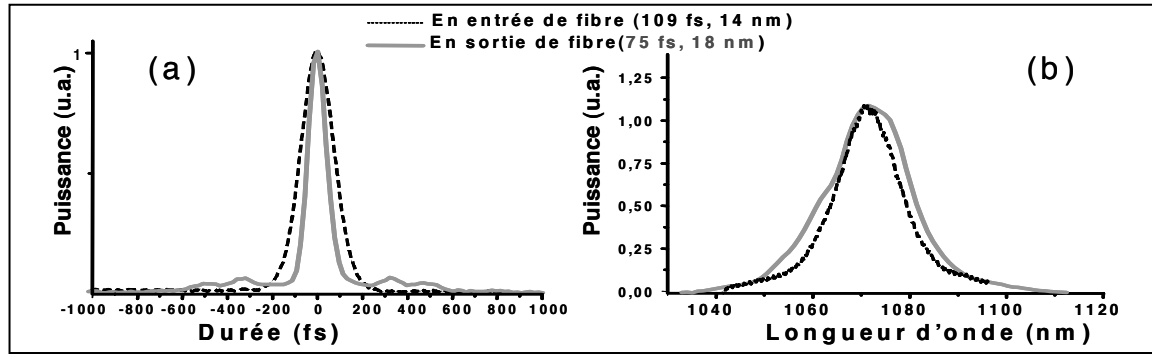


Figure 2-1a. Durée des impulsions (autocorrélation) et leur spectre(b) avant et après autocompression dans une PCF.

Ensuite, pour des puissances plus élevées, les actions combinées de la dispersion et de l'effet Raman conduisent à une scission solitonique. Il y a formation de plusieurs impulsions (fig. 2-2) qu'il est possible d'accorder en longueur d'onde ajustant la puissance couplée dans la fibre. Ce régime de solitons accordables a permis d'obtenir des impulsions accordables entre 1,0 μm et 1,5 μm dont la durée est inférieure à celle de l'impulsion injectée dans la fibre.

Enfin, pour des puissances couplées encore plus élevées, nous avons obtenu la génération d'un continuum de lumière couvrant un domaine spectral de 1 et 1,5 μm sans scission spectrale des solitons.

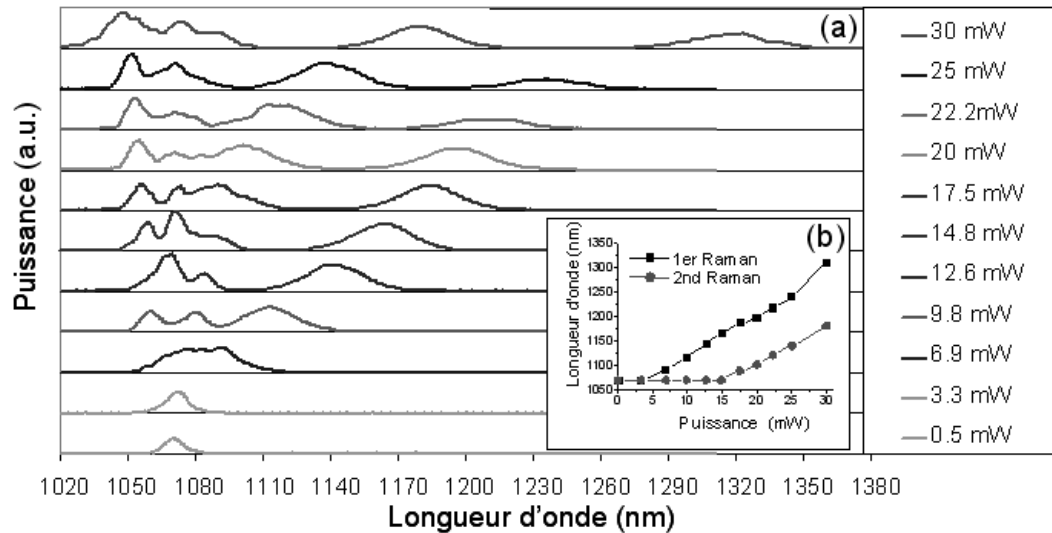


Figure 2-2. Accordabilité des solitons en fonction de la puissance à la sortie d'une PCF à dispersion anormale.

En conclusion, l'association de fibres microstructurées à des oscillateurs femtoseconde émettant dans le proche infrarouge conduit à la réalisation des sources très accordables, simples, robuste et compactes.

b. Élargissement spectral et compression

Nous avons vu précédemment l'intérêt de nos oscillateurs à base de nouveaux cristaux dopés à l'yttrium en termes de simplicité, compacité et robustesse. Cependant, il est intéressant pour certaines applications de réduire encore la durée des impulsions. Ainsi, afin d'améliorer la performance de nos sources, nous avons développé un système simple à base d'une fibre microstructurée (ou fibre à cristaux photonique PCF) dans le

but d'atteindre des impulsions de quelques dizaines de femtosecondes. Pour élargir le spectre et permettre une compression optimale, nous avons utilisé une fibre à dispersion nulle suivie d'une ligne à dispersion négative pour recomprimer temporellement les impulsions. Ce type de système, comparé à l'autocompression par effet solitonique dans une PCF à dispersion négative, permet de repousser les limites de la scission solitonique et de l'autodécalage Raman.

Notre dispositif expérimental est donc constitué (cf. fig. 2-3): d'un oscillateur femtoseconde pompé par diode à base d'un cristal d'Yb:SYS délivrant des impulsions de 110 fs à 1,068 μm avec une puissance moyenne de 300 mW, d'une fibre microstructurée de 20 cm ayant une dispersion nulle à 1,064 μm et un diamètre de cœur de 5 μm , et d'un compresseur à prismes (2 prismes en SF10).

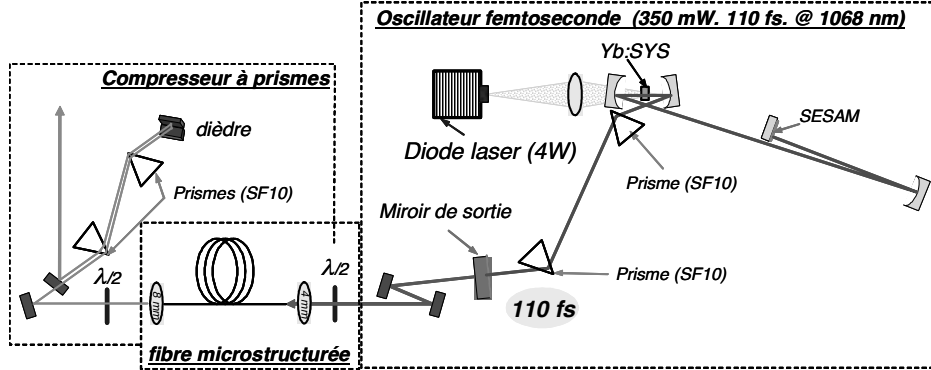


Figure 2-3. Schéma du dispositif expérimental.

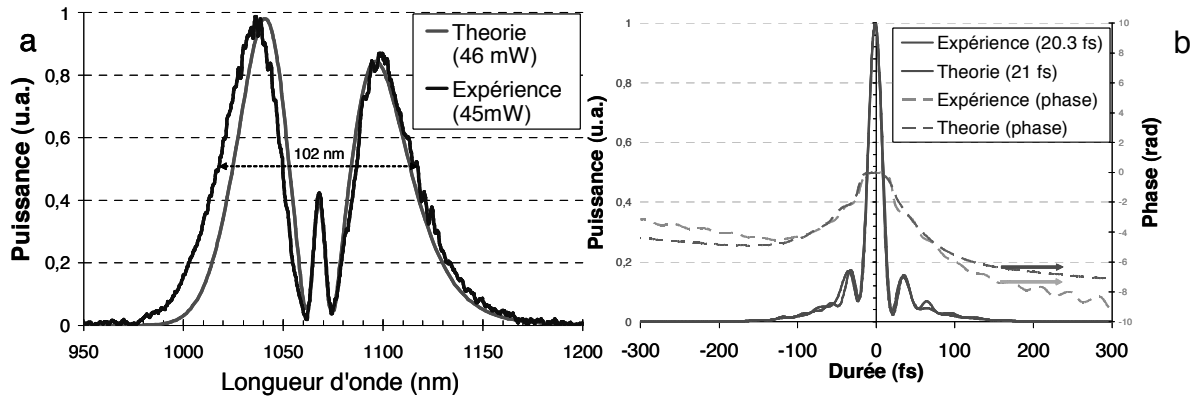


Figure 2-4. Spectres (a) et profils temporels (b) théoriques et expérimentaux des impulsions compressées de 20 fs.

Les impulsions issues de l'oscillateur sont injectées dans la fibre microstructurée dans laquelle les effets non-linéaires -en particulier l'automodulation de phase par effet Kerr- sont importants à cause de l'absence de dispersion de vitesses de groupe. L'automodulation de phase permet d'élargir le spectre des impulsions de 12 nm (à mi-hauteur) à 102 nm (à mi-hauteur) (cf. Fig. 2-4a). Le compresseur à prismes sert à remettre en phase les nouvelles longueurs d'onde générées.

En sortie du compresseur, la durée des impulsions a été réduite d'un facteur 5. Ces impulsions de 20 fs (fig. 2-4b) - soit 6 cycles optiques à mi hauteur- sont les plus courtes jamais obtenues avec ce type de système simple et compact. Pour optimiser notre système de compression d'impulsions, nous avons réalisé des simulations numériques. Celles-ci nous ont permis de montrer que 20 fs correspond à un optimum de compression pour limiter l'influence des impulsions satellites. En effet, nous avons montré théoriquement et expérimentalement qu'il était possible de produire des impulsions encore plus courtes (typiquement 15 fs) mais que dans ce cas là le profil temporel des impulsions était nettement dégradé.

B. Amplificateur à fibres

a. FOPCPA théorique

L'amplification paramétrique en régime étiré (OPCPA pour *Optical Parametric Chirped-Pulse Amplification*) est désormais reconnue comme une technique clef lorsqu'un mécanisme très large bande est requis. Pour des impulsions ultracourtes, typiquement générées par un oscillateur titane-saphir, elle est généralement réalisée

dans un cristal massif de BBO, pour lequel l'accord de phase est réalisé sur une bande extrêmement large pour un certain angle d'interaction. Le mécanisme non linéaire utilisé est alors d'ordre 2.

On peut également faire de l'amplification paramétrique dans les fibres en utilisant la non linéarité d'ordre 3. De nombreuses études ont porté sur cet aspect dans le contexte des télécommunications optiques, et ont montré des limitations assez sévères, comme la diffusion Brillouin de la pompe. Quel que soit l'ordre de la non linéarité, les propriétés de l'amplification sont déterminées par la conservation de l'énergie et par la condition d'accord de phase. Dans les fibres, cette dernière est déterminée uniquement par la courbe de dispersion et par le coefficient non linéaire.

Depuis quelques années, les fibres microstructurées permettent un contrôle de ces propriétés par les paramètres opto-géométriques de la structure. Nous avons donc réalisé une étude numérique (fig. 2-5) de faisabilité d'un amplificateur paramétrique femtoseconde en régime étiré basé sur ces fibres optiques, pour un signal à une longueur d'onde de 1 μm .

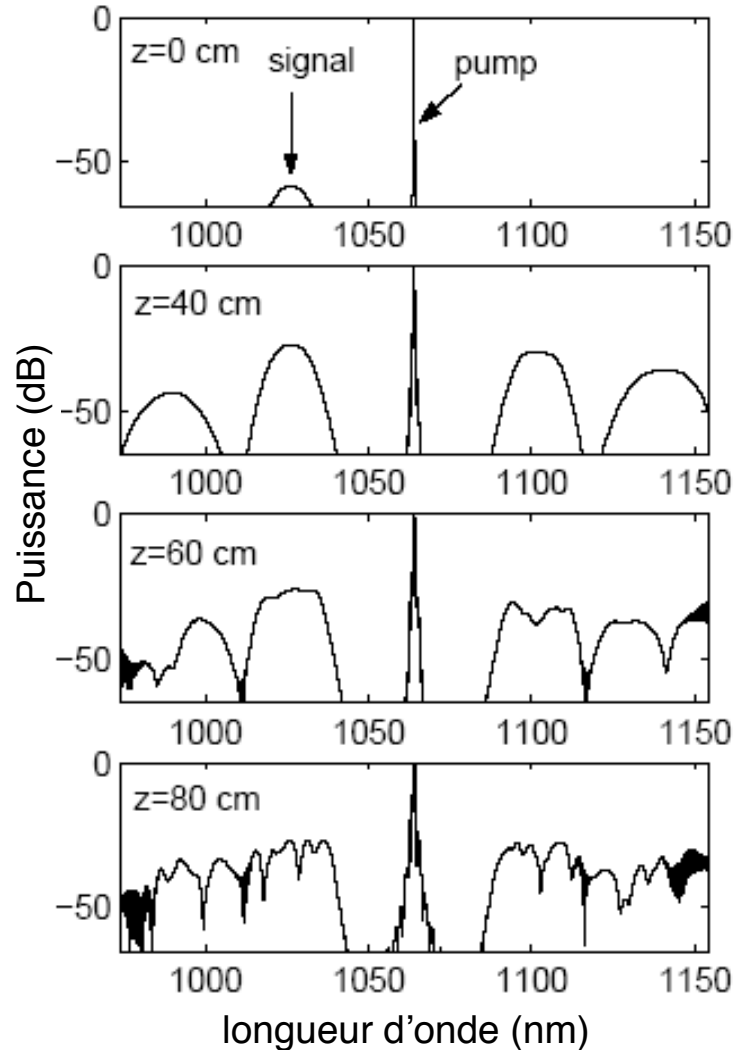


Figure 2-5. Simulation numérique d'un nouveau type d'amplification : amplification FOPCPA

Nous avons montré que l'amplification d'impulsions typiquement délivrées par les oscillateurs femtosecondes ytterbium à 1030 nm par des impulsions picoseconde de lasers néodyme à 1064 nm est faisable en utilisant une fibre microstructurée disponible commercialement avec une amplification pouvant aller jusqu'à 22 dB. Nous avons également montré qu'après optimisation des paramètres de dispersion de la fibre, l'OPCPA à fibre permettrait d'amplifier des impulsions de 80 fs sans rétrécissement spectral par le gain.

b. Amplification parabolique

D'autre part, nous travaillons actuellement sur un projet de développement de source femtoseconde de forte puissance moyenne et forte énergie basée sur l'utilisation de fibres optiques amplificatrices dopées à l'ytterbium. Les fibres optiques dopées à l'ytterbium sont très intéressantes car leur géométrie permet une très bonne dissipation de la chaleur. Les spécifications de cette source sont les suivantes : puissance moyenne

100 W, durée des impulsions inférieures à 100 fs, énergie autour de 100 μ J, taux de répétition de 100 kHz à 1 MHz. Ils seront atteints par l'utilisation d'un préamplificateur basé sur le régime de propagation parabolique, couplé à un amplificateur de puissance pseudo-linéaire en CPA constitué par la fibre à très large cœur. Les caractéristiques combinées d'une durée courte, d'un taux de répétition élevé, d'une longueur d'onde centrale 1050 nm, et d'une énergie suffisante font que cette source serait très adaptée à la génération efficace d'harmoniques élevées dans un gaz rare, ce qui constitue le but final du projet dans la cadre de l'ANR Hipolyff.

L'amplification d'impulsions en régime parabolique est un moyen élégant et efficace pour amplifier des impulsions femtoseconde dans des fibres à dispersion normale. Les impulsions paraboliques sont une solution asymptotique de l'Equation Non-Linéaire de Schrödinger (NLSE) prenant en compte un gain spectral plat, l'Auto-Modulation de Phase (SPM) et la Dispersion de Vitesse de Groupe (GVD). L'interaction de la SPM avec la GVD en présence de gain engendre une impulsion amplifiée présentant une dérive de fréquence linéaire (fig. 2-6). Cette dérive peut théoriquement être compensée avec des arrangements conventionnels d'éléments optiques, réseaux de diffraction ou prismes, produisant une GVD négative. Malheureusement, la solution asymptotique idéale est difficile à atteindre expérimentalement, ou sur une plage de réglages très limitée, à cause d'effets délétères intervenant lors du processus d'amplification. Notamment, la largeur limitée de la bande de gain, la Diffusion Raman Stimulée (DRS) et les ordres élevés de dispersion affectent l'impulsion amplifiée et sa recompression. Jusqu'à présent, seules les limitations par la DRS et la limitation par le gain ont été étudiées alors même que plusieurs travaux notaient la présence d'ordres élevés de phase spectrale fortement nuisibles à la qualité des impulsions recomprimées. Nous avons donc étudié cette limitation dans le but d'augmenter l'énergie et la qualité de recompression des impulsions paraboliques.

Le dispositif expérimental pour ce type d'étude est conceptuellement assez simple : l'oscillateur est directement injecté dans une fibre LMA (large mode area) double-cœur dont la dispersion est dominée par celle du matériau. Cette fibre dopée à l'ytterbium est pompée par une diode de puissance (typiquement 25 W). En sortie de fibre les impulsions amplifiées et étirées sont recomprimées grâce à un compresseur à réseau.

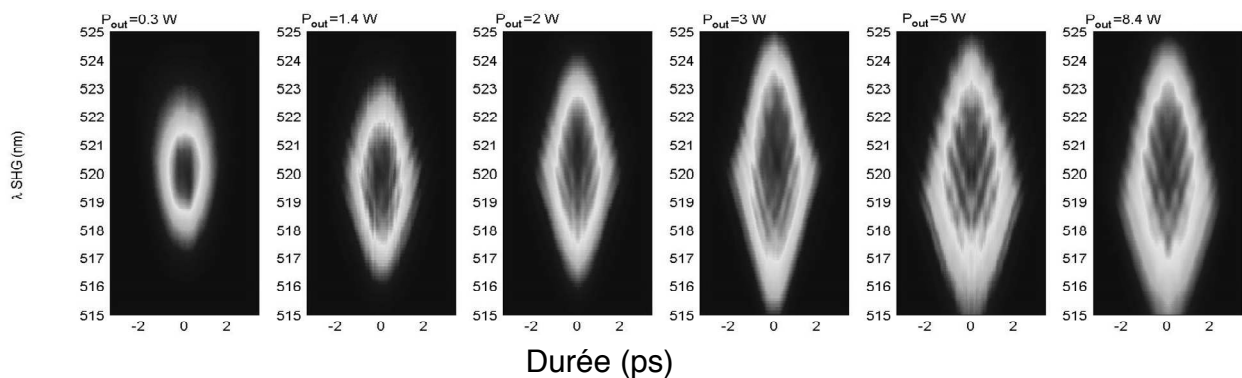


Figure 2-6. Traces FROG expérimentales en sortie d'un amplificateur parabolique pour différentes puissances montrant les élargissements simultanés temporel et spectral grâce à l'action combinée de dispersion de la SPM et du gain.

Pour générer des impulsions ultra-brèves en sortie des amplificateurs parabolique de bonne qualité temporelle, la prise en compte et la compensation des ordres de dispersion élevés est indispensable. La phase spectrale résiduelle des impulsions paraboliques comprimées a donc été mesurée grâce à un FROG et le troisième ordre de dispersion (TOD) identifié comme la principale source de dégradation dans la compression des impulsions paraboliques. Pour parvenir à une bonne qualité temporelle d'impulsions il a donc fallu compenser le TOD. Pour cela, nous avons eu deux approches assez différentes. Premièrement, nous avons étudié la qualité de recompression d'impulsions paraboliques de faible énergie proche de la solution asymptotique de la NLSE. Pour cela nous avons utilisé un système de recompression à « grisms », séquence hybride de prismes insérées dans le compresseur à réseaux, afin d'obtenir une compression optimale. Deuxièmement, nous avons étudié la recompression d'impulsions paraboliques de fortes énergies – loin de la solution asymptotique de la NLSE -. Le concept de compensation d'ordres de phase spectrale élevés par les non-linéarités de la fibre a alors été utilisé afin d'optimiser la compression des impulsions dans un compresseur à réseaux standard.

c. Compensation de TOD par grisms

Dans cette première expérience nous souhaitons travailler proche de la solution asymptotique de la NLSE. Pour cela nous considérons des gains d'amplifications relativement faibles pour garder des spectres quasiment symétriques et négliger le TOD provenant de la SPM produite par des impulsions à spectre asymétrique. On considérera alors uniquement le TOD linéaire.

L'amplificateur est basé sur 4 m de fibre à large mode dopée aux ions ytterbium. Elle possède un diamètre de cœur de 25μm pour le signal et 250μm pour la pompe. L'absorption de la pompe est de 5.5 dB/m à 976 nm. Les deux faces de la fibre sont clivées à 8° afin d'empêcher l'effet laser parasite. Un oscillateur femtoseconde basé sur un cristal d'Yb³⁺:CaGdAlO₄ (Yb:CALGO) produisant des impulsions de 87 fs à 1050nm à un taux de répétition de 105 MHz est utilisé pour injecter la fibre. Afin d'obtenir une convergence rapide vers le régime parabolique, nous diminuons l'énergie d'entrée des impulsions à 400 pJ.

Intéressons nous à l'origine du TOD dans cette configuration expérimentale. Premièrement, la dispersion de la fibre n'est pas purement de la GVD et introduit une contribution non-négligeable au TOD. Dans le cas des fibres à large mode, la dispersion est dominée par celle du matériau, soit $\beta_3 = 6 \times 10^{-5} \text{ ps}^3 \cdot \text{m}^{-1}$. Cette contribution dépend uniquement de la longueur (z) de la fibre. Ainsi, avec nos paramètres expérimentaux, nous avons $\varphi_3 = 24 \times 10^{-5} \text{ ps}^3$. La seconde source de TOD provient de la géométrie du compresseur à réseaux. Dans le cas d'impulsions paraboliques parfaites, le deuxième ordre de phase devant être compensé peut être obtenu en utilisant la méthode la phase stationnaire et est donné par $\varphi_2 = 3\beta_2 / g$, où β_2 est le paramètre de GVD et g est le gain de l'amplificateur à fibre. Le rapport φ_3 / φ_2 fixé par l'architecture du compresseur a un signe opposé à celui de la silice. Un compresseur à réseaux ajoute donc un terme de phase du troisième ordre $\varphi_3 = 28.6 \times 10^{-5} \text{ ps}^3$. Les contributions de la fibre et du compresseur à réseau sont, dans ce cas, comparables.

A 4W de puissance de sortie i.e. une énergie par impulsion de 38nJ, le spectre des impulsions paraboliques est élargi à 23nm à mi-hauteur et la durée de l'impulsion à 2,2 ps. Dans un premier temps, ces impulsions sont comprimées avec une séquence de réseaux en transmissions ayant une densité de traits de 1250 traits/mm. L'efficacité de ces réseaux est de 93% ce qui permet d'obtenir une efficacité globale de compression de 75%. Les impulsions comprimées avec cette séquence dispersive ont une durée de 127 fs, ce qui correspond à un produit largeur spectrale largeur temporelle (TBP) de 0,78 (Fig.7). Comme prévu, on observe une phase spectrale résiduelle aboutissant à la formation de post et pré-impulsions. Le rapport de Strehl temporel (défini comme le rapport de la puissance crête obtenue sur la puissance crête théorique obtenue pour une phase spectrale plate) est dans ce cas de 0,67. Afin de compenser le TOD, nous ajoutons une séquence de prismes en SF10 dans le compresseur à réseaux. Une telle séquence, proposée par Tournois, est connue sous l'appellation de « compresseur à grisms » et permet un réglage indépendant de φ_2 et φ_3 . Des simulations basées sur le calcul des chemins optiques dans le système de compression montrent que le ratio φ_3 / φ_2 peut être ajusté de -4,2 fs, pour une distance nulle entre les prismes, à ~20 fs, pour une distance maximale entre les prismes. Ceci doit nous permettre de compenser le ratio φ_3 / φ_2 égal à 3,5 fs pour une impulsion parabolique idéale. Effectivement, après optimisation de l'architecture du compresseur, la phase spectrale cubique est efficacement éliminée et le rapport de Strehl temporel est augmenté significativement jusqu'à 0,96. De plus, les impulsions recomprimées ont une durée de 107 fs ce qui correspond à un TBP de 0,68. Cette valeur est plus faible que le produit théorique pour une impulsion parabolique (0,73) car la convergence vers le régime parabolique n'est pas totale.

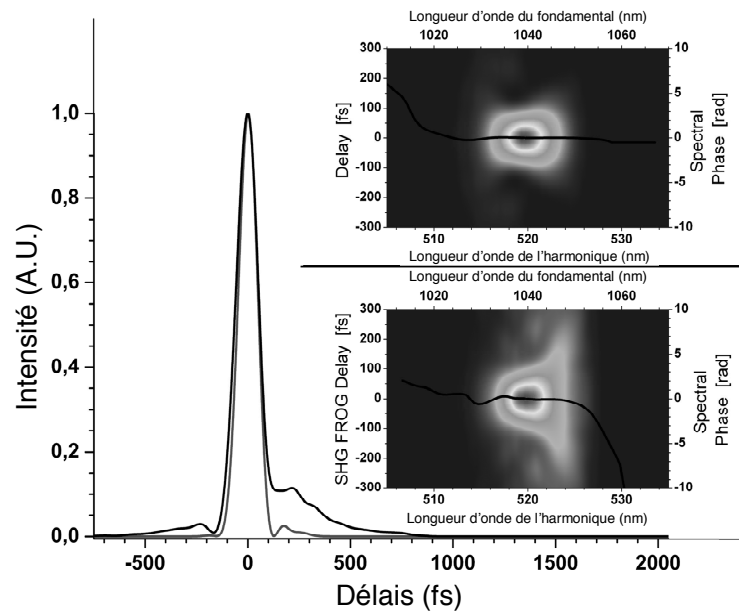


Figure 2-7. Profils temporels des impulsions paraboliques recomprimées avec un arrangement de réseaux (en noir) et la trace FROG associée (en bas) et avec des grisms (en rouge) et la trace FROG associée (en haut).

d. Compensation de TOD par effets non-linéaires

Comme nous venons de le voir l'amplification en régime parabolique nécessite un soin particulier quant à la gestion du TOD. Nous nous sommes aussi intéressé à la Compensation de TOD par effets non-linéaires. En effet, depuis la découverte de la propagation autosimilaire d'impulsion dans les fibres optiques, beaucoup d'efforts de recherches ont été orientés sur la génération des impulsions élevées ultrabrèves et de bonne qualité. Ici, nous rapportons la génération d'impulsions de 63 fs pour une puissance crête de 4 MW à la longueur d'onde de 1050 nm, correspondant à une énergie de 0,28 μ J. Ces résultats sont obtenus avec un amplificateur parabolique suivi d'un compresseur simplement constitué d'une paire de réseaux. L'astuce ici pour compenser le TOD consiste à utiliser la limite de bande d'amplification. Ainsi en travaillant au-delà de la limite de bande (qui est en général considérée comme délétère) nous asymétrisons le spectre et subséquemment la phase spectrale (par automodulation de phase en régime étiré) pour compenser le TOD. Grâce à cela nous avons obtenu les impulsions les plus brèves et le plus énergétiques à l'aide d'un amplificateur parabolique et de surcroît avec une très bonne qualité spatiale.

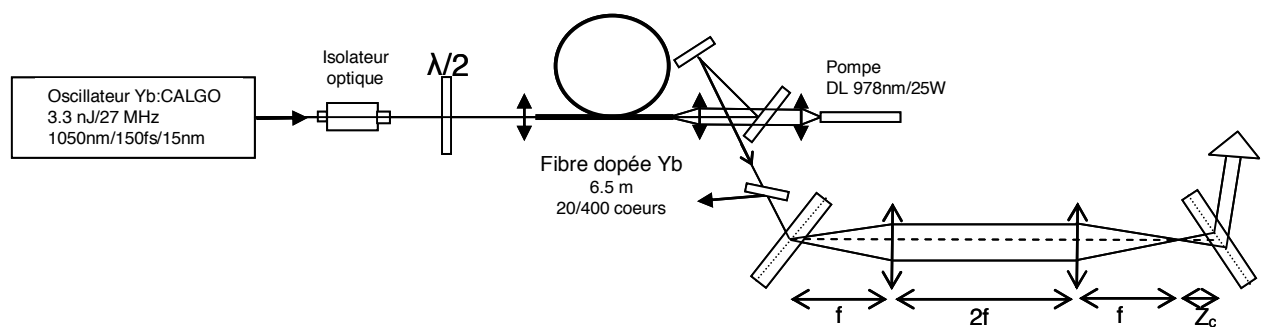


Figure 2-8. Schéma expérimental.

Le schéma expérimental de l'amplificateur (Fig. 2-8) consiste en un oscillateur Yb :CALGO basse cadence 27 MHz délivrant des impulsions injectées dans une fibre de 6.5 m. La fibre est une fibre à maintien de polarisation dopée à l'ytterbium double gaine et à large mode : 20 μ m pour le cœur laser et 400 μ m pour le cœur de pompe. Les impulsions amplifiées sont comprimées avec un compresseur à haute efficacité (70 %) à base seulement de réseaux fonctionnant en transmission 1250-line/mm.

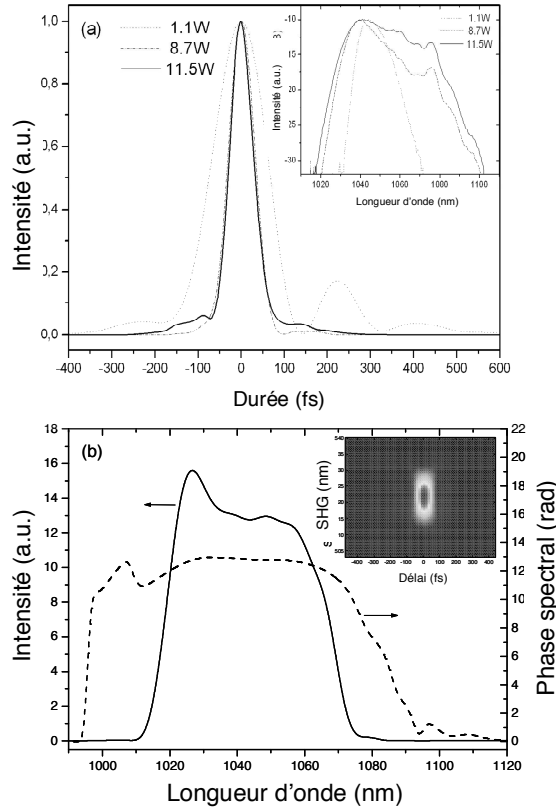


Figure 2-9. Haut : impulsions temporelles pour 3 puissances différentes (insert : spectre correspondant), bas : spectre et phase spectrale correspondants à la puissance maximale (insert : spectrogramme FROG).

Pour avoir accès à la qualité temporelle des impulsions nous les avons mesurées grâce à une FROG. Les résultats sont indiqués sur la figure 2-9. La puissance moyenne est de 11.5 W avant compression soit 7,8 W après compression. À la compression optimale, le spectre est de 48 nm et la durée de 63 fs, correspondant à un produit de durée – bande passante de 0,84 (0,73 théoriquement pour l'impulsion parabolique idéale). L'automodulation de phase asymétrique induite par le spectre asymétrique de l'impulsion étirée joue clairement un rôle sur la bonne qualité de la recompression. En effet, nous avons mesuré une amélioration claire de la qualité des impulsions avec la puissance (fig. 2-10). Ceci permet la compensation de la phase spectrale de troisième ordre induite par la dispersion linéaire de la fibre et du compresseur.

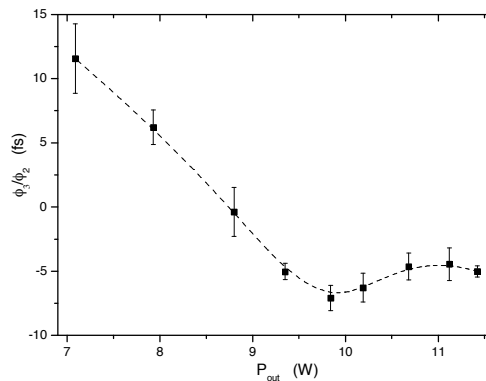


Figure 2-10. Compensation de la TOD avec la puissance par effets non-linéaires.

C. Synthèse des travaux

L'utilisation de systèmes à fibres après nos oscillateurs nous a permis d'améliorer leurs performances à la fois en durée avec l'obtention d'impulsions de 20 fs mais aussi en puissances (moyenne et crête) avec l'obtention d'impulsions de 63 fs avec une puissance moyenne de 7.8 W. Pour visualiser ces améliorations nous les avons tracées sur le même graphe que nos oscillateurs : figure 2-11.

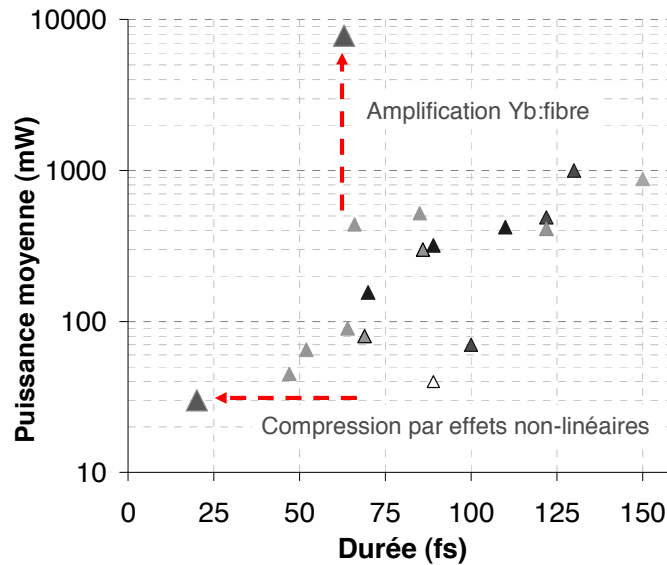


Figure 2-11. Améliorations apportées par l'adjonction d'un module fibré par rapport à nos oscillateurs. Les petits triangles représentent l'état de l'art pour nos différents oscillateurs. Les gros triangles au bout des flèches montrent les nouvelles performances obtenues grâce à l'ajout d'un système à fibre.

5. Encadrement

Les travaux sur les fibres à cristaux photoniques passives en régime femtoseconde ont été réalisés avec Nicolas Sanner lors de son stage de troisième année d'ingénieur. Et les travaux sur l'amplification parabolique ont été réalisés avec Dimitris Papadopoulos et Yoann Zaouter lors respectivement de leur post-doctorat et thèse.

Dimitris Papadopoulos	Post-doctorant stage ESO 3	40 %	1 article	2007
Nicolas Sanner		100 %	1 article	Mai-septembre 2002
Yoann Zaouter	Doctorant CELIA avec Amplitude	15 %	1 article	2005- ...

6. Publication et communication

Articles

- a[23] F. Druon, N. Sanner, G. Lucas-Leclin, P. Georges, K.P. Hansen, A. Peterson, "self-compression and Raman soliton generation in a photonic crystal fiber of 100-fs pulses produced by a diode-pumped Yb-doped oscillator", *Applied Optics*, Vol. 42 Issue 33 6768-70 (2003)
- a[29] F. Druon and P. Georges, "Pulse-compression down to 20 fs using a photonic crystal fiber seeded by a diode-pumped Yb:SYS laser at 1070 nm," *Opt. Express* 12, 3383-3396 (2004), <http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=OPEX-12-15-3383>
- a[42] M. Hanna, F. Druon, and P. Georges, "Fiber optical parametric chirped-pulse amplification in the femtosecond regime," *Opt. Express* 14, 2783-2790 (2006).
- a[51] Christelle Lesvigne, Vincent Couderc, Alessandro Tonello, Philippe Leproux, Alain Barthélémy, Suzanne Lacroix, Frédéric Druon, Pierre Blandin, Marc Hanna, and Parick Georges "Visible supercontinuum generation controlled by intermodal four-wave mixing in micro-structured fibre" *opt. Lett* (2007)
- a[52] Y. Zaouter, D. N. Papadopoulos, M. Hanna, F. Druon, E. Cormier, and P. Georges, "Third-order spectral phase compensation in parabolic pulse compression," *Opt. Express* 15, 9372-9377 (2007)
- a[53] . N. Papadopoulos, Y. Zaouter, M. Hanna, F. Druon, E. Mottay, E. Cormier, and P. Georges, "Generation of 63 fs 4.1 MW peak power pulses from a parabolic fiber amplifier operated beyond the gain bandwidth limit," *Opt. Lett.* 32, 2520-2522 (2007)

Conférences invitées

- ci[4] F. Druon, G. Lucas-Leclin, P. Georges, "Effets non-linéaires dans les fibres microstructurées : application à l'autocompression d'impulsions", **conférence invitée à l'Horizons de l'Optique 2003**, Toulouse 3-5 septembre 2003
- ci[12] F. Druon and P. Georges, "20 fs pulse compression using a photonic crystal fiber seeded by a diode pumped Yb:SYS laser", **Photonics West 2005**, San José USA (Janvier 2005), Publication des actes dans : *Fiber laser II: technology, systems, and applications*, edited by L.N. Durvasula, J.W. Brown, Johan Nilsson, *Proceedings SPIE* Vol. 5709 (SPIE, Bellingham, WA, 2005) 1-12

Conférences avec publications d'actes

- ca[14] F. Druon, N. Sanner, G. Lucas-Leclin, P. Georges, J. Dudley, "Self-compression effects and Raman soliton generation in a photonic crystal fiber seeded by a 100-fs-pulsed diode-pumped Yb-doped oscillator", **Advanced Solid State Photonics 2003**, 2-5 february 2003, San Antonio, USA. Publié dans : *OSA Trends in Optics and Photonics* Vol. 83, *Advanced Solid State Lasers*, John Zaybowski, ed. (Optical Society of America, Washington, DC 2003), pp. 96-99.

Conférences sans publications d'actes

- c[22] F. Druon, N. Sanner, G. Lucas-Leclin, P. Georges, R. Gaumé, B. Viana, K. P. Hansen, A. Petersson, " *Self-compression of 1- μ m femtosecond pulses in a photonic crystal fiber* ", **Post deadline paper** at **CLEO 2002**, Long Beach CA, US, May 2002
- c[24] F. Druon, G. Lucas-Leclin, N. Sanner, P. Georges, " *Auto-compression d'impulsions femtosecondes à 1 μ m dans une fibre à cristaux photoniques* ", Journées Nationales de l'Optique Guidée **JNOG 2002**, Dijon, septembre 2002
- c[36] G. Lucas-Leclin, F. Druon, P. Georges, "Sources d'impulsions solitoniques auto-compressées et accordables en longueur d'onde de 1 μ m à 1,5 μ m" **JPU 2003** - 6èmes journées des phénomènes ultra-rapides, Mittelwihl (22-24 octobre 2003)
- c[37] F. Druon, P. Georges, "Génération d'impulsions de 23 fs à 1 μ m à partir d'un oscillateur pompé par diode et d'une fibre microstructurée à dispersion nulle" **JPU 2003** - 6èmes journées des phénomènes ultra-rapides, Mittelwihl (22-24 octobre 2003)
- c[41] E. Druon, G. Lucas-leclin, P. Georges, "Effets non-linéaires dans les fibres microstructurées : application à l'autocompression d'impulsions" **Conférence Invitée – COLOQ 8**, Septembre 2003, Toulouse, France
- c[61] F. Druon, P. Georges, S. Lebrun, P. Delaye, "Non-linear effects in microstructured optical fibers", **Indo-French young scientists meeting on Laser Physics and Quantum Optics** organized by the Indo-French Centre for the Promotion of Advanced Research (IFCPAR-CEFIPRA), Bangalore, India, january 4-8, 2006
- c[67] M. Hanna, F. Druon, P. Georges, "Optical Parametric Chirped-Pulse Amplification in Fibers" , Poster : **EOS Meeting**, Paris (Octobre 2006)
- c[75] Y. Zaouter, M. Hanna, F. Druon, E. Cormier, P. Georges "Third-order spectral phase compensation in parabolic pulse compression" **CLEO/Europe 2007**, 17-22 June 2007 Munich, Germany.
- c[76] D. Papalopoulos, Y. Zaouter, M. Hanna, F. Druon, E. Mottay, E. Cormier, P. Georges "Generation of 63-fs 4.6-MW pulses from a fiber parabolic amplifier" **CLEO/Europe 2007 Post-deadline**, 17-22 June 2007 Munich, Germany.

Sources picoseconde basse cadence

1. Introduction

Les cristaux les plus performants utilisés actuellement dans les lasers pompés par diode sont sans nul doute les matériaux dopés aux ions néodyme⁶. La transition ${}^4F_{3/2}$ - ${}^4I_{11/2}$ autour de $1\ \mu\text{m}$ du Nd^{3+} dans des matrices cristallines qui est extrêmement efficace et qui exhibe un très fort gain, est un atout incontestable pour le développement de lasers performants. Le revers de la médaille des cristaux dopés aux ions néodyme est la faible largeur de leur raie d'émission. Ceci limite la durée des impulsions à, au mieux, quelques picosecondes. Néanmoins, pour un certains nombres d'applications, il n'est nullement nécessaire de générer des impulsions sub-picoseconde et les systèmes à base de néodyme sont les plus adéquats.

2. But des travaux

Mon activité de recherche dans ce domaine a consisté à réaliser des lasers aux performances atypiques. Le but était de travailler sur l'architecture laser pour obtenir des régimes de fonctionnement nouveaux avec des cristaux classiques tels le Nd:YVO_4 ou Nd:GdVO_4 . Ainsi, pour des applications en micro-usinage et en microscopie par mesure de temps de fluorescence (FLIM : fluorescence lifetime imaging microscopy) il est nécessaire d'avoir des oscillateurs picoseconde à des cadences de 1 à 10 MHz. Nous avons donc travaillé sur le développement de nouvelles sources d'impulsions picoseconde à 1064 nm à verrouillage des modes en phase à très basse cadence basées sur des cavités extrêmement longues.

Pour le microusinage où l'on souhaite des impulsions énergétiques et à haute cadence, le MHz correspond à un bon compromis énergie/cadence pour l'oscillateur. En effet, dans ce cas, il est possible d'amplifier, de manière simple et très efficace, ces impulsions déjà relativement énergétiques. La réalisation d'une source extrêmement simple à base de matériaux néodyme suscite un fort intérêt du point de vue industriel.

Pour la microscopie, on veut produire des impulsions visibles à quelques MHz ce qui correspond au typiquement à l'inverse des temps de vie que l'on souhaite mesurer. Les oscillateurs basse-cadence sont donc aussi très intéressants pour ce type d'applications. Les longueurs d'onde visée étant dans le bleues où absorbe la plupart des fluorophores, nous avons travaillé sur des lasers picoseconde émettant sur la raie à 914 nm de ces matériaux ; car, une fois la fréquence doublée par effets non-linéaires, ce type de sources a un fort potentiel. Cependant, les performances mitigées des oscillateurs à 914 nm nous ont amené à étudier une solution alternative pour arriver à des impulsions picoseconde dans le bleu. Pour cela nous sommes partis d'un oscillateur basse cadence à 1064 nm ; et nous avons étudié des nouvelles fibres microstructurées inédites fortement biréfringentes qui optimisent les effets non-linéaires de type mélanges à quatre ondes pour la génération de supercontinuum visible.

3. Cadre d'étude et collaborations

Ces recherches se sont faites, pour la partie lasers picoseconde à faible taux de répétition et pour la partie lasers à 914 nm en collaboration, avec le Laboratoire de PhotoPhysique Moléculaire de l'université Paris Sud. Nous avons aussi collaboré avec Vincent Couderc du laboratoire Xlim à Limoges pour les travaux concernant la technique de verrouillage de modes duale.

Le développement de la source pour le micro-usinage s'est faite en collaboration avec l'entreprise Thalès laser à travers un contrat Astre du Conseil Général de l'Essonne.

La génération de continuum en régime picoseconde a été faite en collaboration avec le Xlim de limoges et le LPPM d'Orsay dans le cadre du programme BIPEPSIC de l'université Paris XI.

⁶ « Le néodyme, après tout, était-ce autre chose qu'un LSD du matériau vulgaire, capable de tirer de la verroterie des délires iridescents ? »

4. Principaux résultats

A. Des longueurs atypiques

La réalisation d'une source picoseconde avec des caractéristiques atypiques en termes de cadence se révèle très intéressante pour des applications en spectroscopie de fluorescence résolue en temps. En effet, cette application nécessite de disposer de sources laser impulsionnelles (de durée entre 10 et 20 ps) fonctionnant dans le visible ou l'ultraviolet. De plus, un taux de répétition de quelques MHz au plus, est nécessaire si l'on cherche à étudier des temps de vie « longs » (plusieurs dizaines de nanosecondes).

Pour répondre à ce besoin, nous avons travaillé sur une source laser entièrement passive fonctionnant en régime de verrouillage de modes en phase. Ce régime permet d'obtenir simplement des impulsions très courtes (quelques picosecondes à 1064 nm). Cependant, la cadence des impulsions produites est inversement proportionnelle à la longueur de la cavité : pour obtenir un taux de répétition de quelques Mégahertz, nous avons donc défini des cavités laser pouvant atteindre plusieurs dizaines de mètres de long. Pour ce faire, on utilise une cellule multipassage constituée de deux miroirs concaves et de deux miroirs plans permettant d'allonger la longueur de la cavité tout en conservant un encombrement réduit (fig. 3-1). En couplant ce dispositif à un absorbant saturable à base de semiconducteur (SESAM), on obtient des impulsions de quelques ps à une cadence de 1,2 MHz, la plus basse rapportée à ce jour pour un laser de ce type. La puissance moyenne étant de quasiment 0,5 Watt, la puissance crête est suffisamment élevée (25 kW) pour pouvoir réaliser directement et simplement plusieurs étages de conversion de fréquence pour atteindre une émission dans le visible.

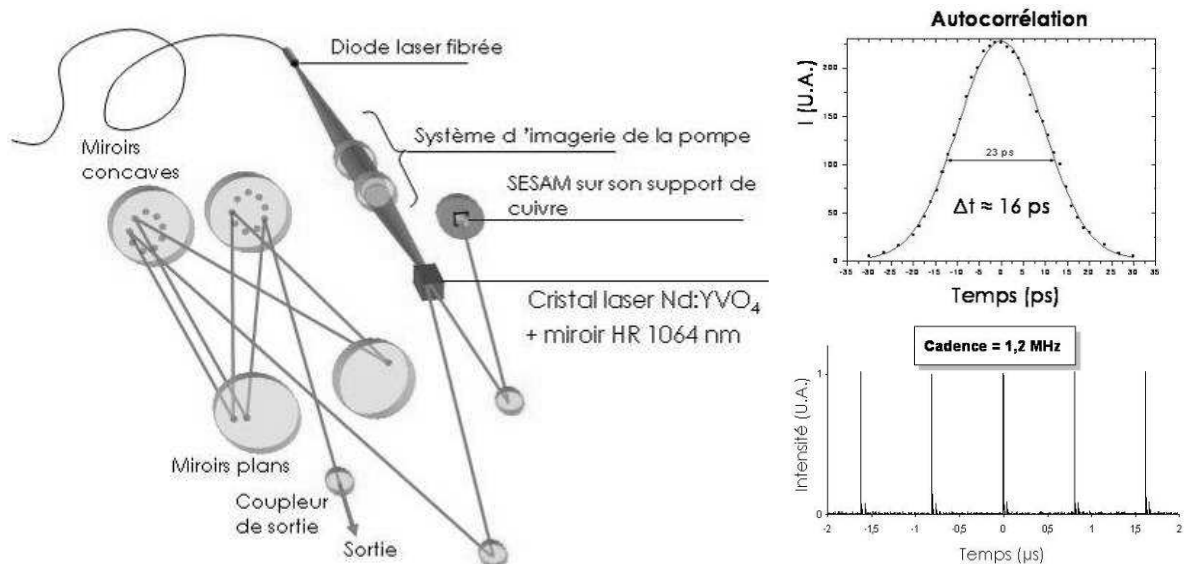


Figure 3-1. Schéma du laser impulsionnel basse cadence et performances caractéristiques (durée et cadence).

Cependant, cette longue cavité implique de sérieux problèmes de stabilité du régime impulsionnel surtout à long terme. Ce qui a pour principale conséquence un réaligement régulier de la cavité et un endommagement de l'absorbant saturable à base de semi conducteur. Nous avons donc étudié un moyen de stabiliser la cavité précédente. Nous avons mis au point une technique de verrouillage de mode duale (fig. 3-2). Ce système dual combine un SESAM et la technique de rotation de polarisation par effet non-linéaire quadratique (QPS quadratic polarization switching). Cette technique permet deux choses : un réglage fin de la profondeur de modulation de l'absorption saturée de la QPS et une réduction des contraintes sur le SESAM afin de limiter les risques d'endommagement de ce composant.

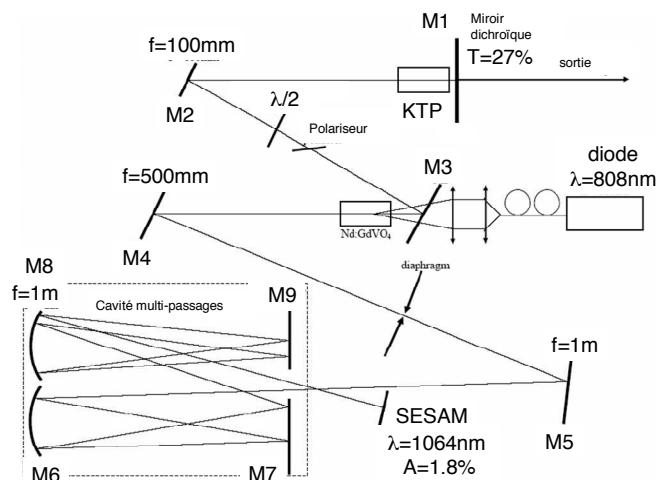


Figure 3-2. Schéma d'une cavité à verrouillage de mode dual.

Cette nouvelle technique a permis d'une part d'augmenter la stabilité à long terme du système développé à base d'un cristal de Nd:YVO₄ ; et d'autre part de permettre le verrouillage de mode en phase d'un laser Nd:GdVO₄ ce qui n'avait jamais été fait auparavant. Cette source ainsi fiabilisée a été utilisée pour faire de la génération de supercontinuum (cf. *effets non-linéaires et amplification dans les fibres* 4.C) et aussi comme oscillateur pour une source amplifiée pour le micro-usinage (cf. *applications et perspectives* 4.A). Elle est actuellement à l'ENS Cachan pour des études d'excitation des centres colorés du diamant.

B. Des amplificateurs très performants

Pour des applications où il est nécessaire d'avoir plus de puissance moyenne et plus d'énergie, nous avons développé une structure d'amplification géométrique efficace pour les impulsions picoseconde. Ainsi, dans la continuité de mes travaux de thèse sur l'amplification de microlaser (le DualChip) et dans le but d'augmenter encore la puissance moyenne, un nouvel amplificateur original utilisant les 3 dimensions de l'espace a aussi été développé. En effet, la zone de gain créée par la pompe (généralement fibrée) dans le cristal amplificateur a une géométrie conique : pour optimiser le recouvrement entre cette zone de gain et le trajet du faisceau à amplifier, on réalise un montage optique permettant de réaliser les différents passages dans le cristal amplificateur sous un angle d'incidence différent à chaque fois et adapté au cône de gain (fig. 3-3b). En pratique, on utilise des coins de cubes associés à une lentille pour réinjecter le signal à amplifier dans le cristal (fig. 3-3a)

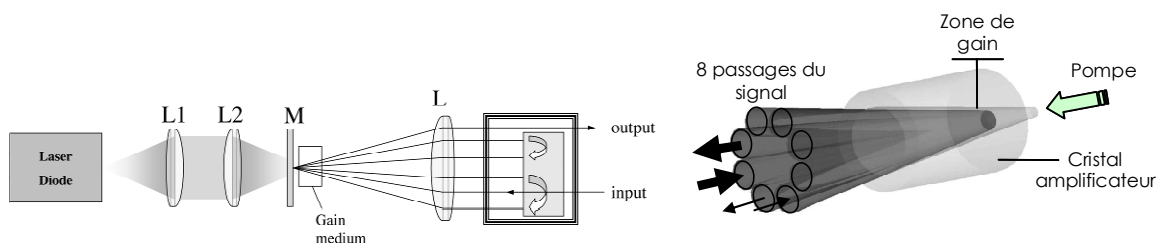


Figure 3-3. a : schéma du montage optique permettant de réaliser pratiquement la géométrie décrite en figure b. Les optiques utilisées pour décaler spatialement le faisceau sont des coins de cubes. b : géométrie tridimensionnelle de l'amplificateur multipassage. On adapte les ouvertures numériques de façon à optimiser le recouvrement entre la pompe (en vert) et le signal (en rouge).

Les expériences réalisées au laboratoire ont ainsi permis d'obtenir une puissance moyenne de 7.5 W (fig. 3-4) de rayonnement IR à 4 Mhz, en 4 passages dans le cristal et un gain petit signal supérieur à 40 dB. La cadence et la durée des impulsions, ainsi que la qualité spatiale du faisceau laser sont conservées par l'amplificateur passif ce qui le rend particulièrement attractif de par sa simplicité. Ainsi des impulsions de 15 ps ont été générées à cette puissance moyenne ce qui correspond à des puissances crêtes de 125 kW.

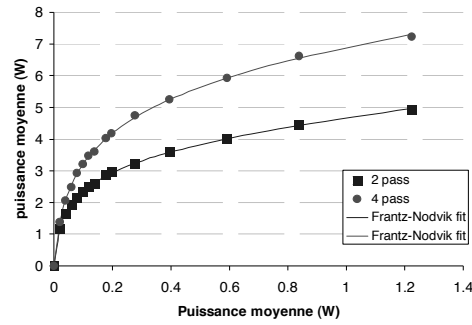


Figure 3-4 : performance de l'amplificateur en double et quadruple passage dans l'amplificateur en fonction de la puissance moyenne d'un train d'impulsions à 4 MHz.

Pour augmenter l'énergie des impulsions et choisir la cadence des impulsions de manière simple et directe, un modulateur acousto-optique a été inséré juste en amont de l'amplificateur. Il est alors possible d'obtenir des énergies jusqu'à 80 μJ en 4 passages avec une bonne qualité spatiale ce qui permet d'envisager des applications en micro-usinage comme nous le verrons dans le chapitre *applications et perspectives* 4A.

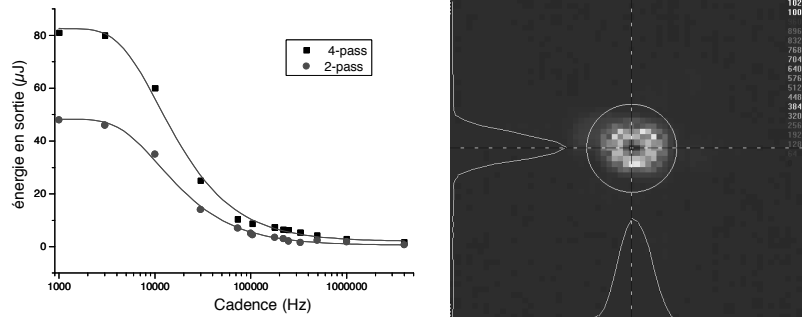


Figure 3-5. Gauche : performance en énergie de l'amplificateur en double et quadruple passage dans l'amplificateur en fonction de la cadence du train d'impulsions. Droite : profil spatial en sortie de l'amplificateur après 4 passages.

C. Des longueurs d'onde atypiques

Nous présentons ici un laser impulsif à verrouillage de modes en phase passif directement pompé par diode, utilisant la transition $^4F_{3/2}$ - $^4I_{9/2}$ de l'ion néodyme à 914 nm. Ce laser picoseconde a été réalisé en vue d'application en microscopie de fluorescence. Depuis quelques temps, la transition $^4F_{3/2}$ - $^4I_{9/2}$ de l'ion néodyme autour de 900-950 nm selon les matrices, est au centre de nombreuses expérimentations : elle permet, en utilisant un cristal doubleur, de générer des longueurs d'onde visibles dans le bleu. La génération de telles longueurs d'onde trouve de nombreuses applications, notamment dans le domaine biomédical puisque l'excitation de certains fluorophores nécessite de travailler dans le visible.

L'utilisation de la raie à 914 nm d'un cristal de Nd:YVO₄ est assez délicate. Tout d'abord, à cette longueur d'onde, l'ion néodyme se comporte comme un système quasi trois niveaux. En effet, le niveau $^4I_{9/2}$ est seulement 433 cm^{-1} au dessus du niveau fondamental. Par conséquent, ce niveau est assez fortement peuplé (5%) à température ambiante, limitant ainsi l'inversion de population. Ensuite, le rapport entre la section efficace d'émission stimulée à 914 nm $\sigma(914\text{nm})$ et celle de la transition à 1064 nm $\sigma(1064\text{nm})$ vaut 0.04. Cette section efficace $\sigma(914\text{nm})$ relativement faible entraîne un seuil laser élevé, ce qui nécessite une intensité de pompe conséquente. Cette dernière raison expliquait pour beaucoup l'absence de lasers impulsifs à 914 nm directement pompé par diode. En effet, la plupart des travaux jusqu'à aujourd'hui se sont focalisés sur la transition $^4F_{3/2}$ - $^4I_{9/2}$ à 947 nm du Nd:YAG beaucoup plus accessible puisque le rapport des sections efficaces est de 0.09 dans ce cas. Des lasers impulsifs Nd:YVO₄ à verrouillage de modes en phase passif ont déjà été réalisés. Le système de pompage de ces dispositifs est basé sur un laser Ti:saphir, permettant ainsi d'avoir un faisceau de pompe de très bonne qualité spatiale. Notre laser est quant à lui le premier laser à verrouillage de modes en phase à 914nm pompé par une diode, simplifiant ainsi grandement le dispositif. Pour réaliser ce laser impulsif, nous avons choisi un verrouillage des modes en phase à l'aide d'un SESAM. Pour s'affranchir de la concurrence de l'effet laser à 1064 nm, nous devons aussi introduire de fortes pertes dans la cavité à 1064nm : le traitement des miroirs est choisi en conséquence. La cavité laser est représentée sur la figure 3-6. On réalise le pompage avec une diode fibrée à 808 nm de puissance 10W, dont le diamètre de cœur de fibre est 100 μm . Le cristal de Nd:YVO₄ utilisé est dopé à 0.2% et a une longueur de 4mm. Les miroirs de

la cavité sont traités haute transmission à 1064nm et haute réflexion à 914nm, pour supprimer les oscillations parasites à 1064nm.

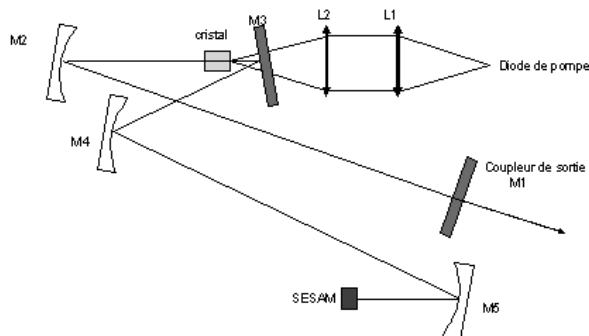


Figure 3-6. Schéma de la cavité laser d'impulsions à 914 nm.

Dans les conditions de travail, la puissance incidente sur le cristal est de 5.8W. Le cristal absorbe une puissance de 3.5W. Nous obtenons une puissance en sortie du coupleur de 40mW. Le laser fonctionne à une cadence de répétition de 94 MHz. Nous mesurons la durée de ces impulsions par autocorrélation (fig. 3-7). La largeur à mi-hauteur est de 8.8 ps.

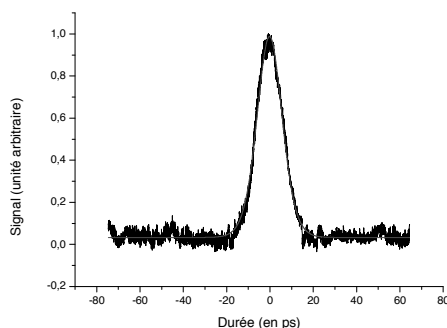


Figure 3-7. Autocorrélation de l'impulsion. Nous obtenons une durée de 8.8 ps à mi-hauteur

L'observation du spectre nous révèle l'absence d'effet laser à 1064nm. C'est donc bien la transition $4F_{3/2}-4I_{9/2}$ qui produit l'effet laser observé. Le spectre d'émission est centré autour de 914.6 nm.

Cependant, la gamme de puissance où le verrouillage de modes reste stable est assez petite. En-dehors de cette zone, les impulsions sont modulées par une enveloppe : on est alors en régime déclenché verrouillé en phase. Ces problèmes de stabilité nous ont empêché de poursuivre notre étude sur les lasers à 914 nm notamment concernant le développement de cavités décimétrique.

D. Génération de supercontinuum

Dans la perspective de réaliser une source basse cadence dans le bleu, nous avons vu que le développement d'une source ps à 914 nm pose beaucoup de problèmes. Nous avons donc étudié une solution alternative qui consiste à partir de la source à 1064 nm précédemment décrite chapitre 4A et à utiliser des fibres optiques à cristal photonique pour générer un supercontinuum visible allant de 450 nm à 1800 nm. Dans ce cadre nous nous sommes intéressés aux processus intervenant dans la génération de supercontinuum et en particulier de continuums polarisés dans des fibres fortement biréfringentes.

La génération d'un supercontinuum picoseconde visible et polarisé est intéressante pour des applications en biologie, en particulier pour la microscopie FLIM. La source doit couvrir une grande partie du spectre visible pour permettre l'utilisation de divers fluorophores. De plus, un faisceau blanc polarisé a de l'intérêt pour avoir accès à la dépendance de polarisation des échantillons biologiques.

La fibre utilisée est une fibre à cristal photonique fortement biréfringente dont la géométrie est représentée sur la figure 3-8. La biréfringence de la fibre induite par une rupture symétrie a été mesurée à $7,10^{-3}$. Le mode LP01 est de $4 \mu\text{m}^2$. Pour le mode LP010, les longueurs d'onde de zéro-dispersion (ZDW) sont 825 nm pour la polarisation x et 866 nm pour la polarisation y. Pour le mode LP11, les ZDW sont 750 nm pour la polarisation x et 766 nm pour la polarisation y.

La première expérience présentée a été réalisée avec une fibre de 1,4 m afin de cerner le processus de formation de continuum visible. C'est un bon compromis de longueur: car elle permet l'observation du

continuum visible mais aussi l'observation des pics provenant du mélange de quatre ondes qui sont à l'origine du supercontinuum. La deuxième expérience présentée a été réalisée avec une fibre plus longue (4 m) afin d'obtenir les spectres visibles les plus étendus, dans le point de vue d'employer cette source pour des applications biologiques. Dans les deux expériences, les fibres sont soigneusement positionnées pour avoir un contrôle précis et repérer la polarisation d'entrée en fonction des axes propres de la fibre. Le mode du continuum visible est typiquement LP11, comme représenté sur le schéma 3.

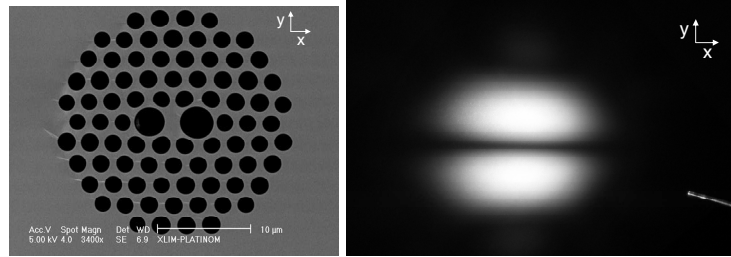


Figure 3-8. Structure de la fibre biréfringente et mode LP11 du continuum visible.

Afin d'observer le processus de génération du supercontinuum, nous avons observé en premier lieu les spectres produits en fonction de la puissance moyenne couplée ceci pour les deux axes principaux de la fibre. Nous avons observé un continuum IR en mode LP10 et un continuum visible dans le mode LP11 (fig. 3-8). La polarisation linéaire du mode est conservée et identique à la polarisation du faisceau d'entrée à 1064 nm. En ce qui concerne le processus de génération de continuum dans l'IR aucune différence n'est visible entre les 2 polarisations: pour une puissance moyenne couplée supérieure à 50 mW un continuum relativement plat apparaît de 1 μm à 1750 nm (fig. 3-9). Cette absence de différence avec la polarisation est principalement liée au fait que ce continuum est produit par effet Raman en régime solitonique, processus indépendant de la polarisation.

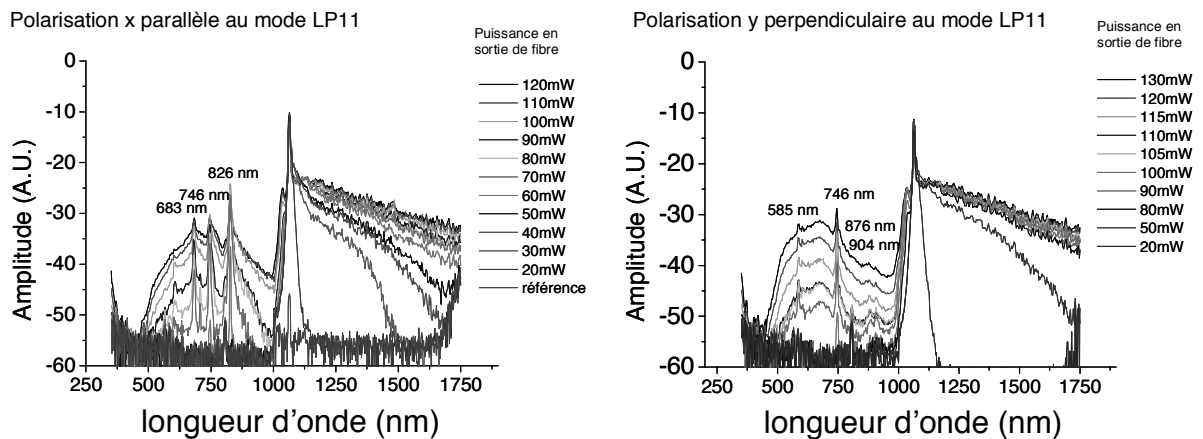


Figure 3-9. Supercontinuum en fonction de la puissance couplée dans la fibre pour les axes x et y de la fibre.

Au contraire, la partie visible du continuum montre un comportement fortement dépendant de la polarisation. Les longueurs d'onde visibles apparaissent consécutivement au continuum IR, soit pour une puissance moyenne autour de 60 mW pour la polarisation X soit autour de 90 mW pour la polarisation Y. La génération du continuum visible est amorcée par des pics provenant d'un processus de mélange à quatre ondes. Ce mélange à quatre ondes implique une condition d'accord de phase qui dans le cas de cette fibre très anisotrope dépend fortement de la polarisation. Ceci a été corroboré avec des expériences faites avec des fibres plus courtes permettant l'observation d'un pic dans l'IR correspondant à la conservation d'énergie. Par exemple, en polarisation X, le pic à 826 nm est corrélé avec un pic à 1480 nm dans l'IR. Comme le montre la figure 3-9, la longueur d'onde de ces pics dépend des courbes de dispersion. L'accord de phase intermodale dépend donc de la polarisation d'entrée de la pompe ; et l'amorçage du supercontinuum blanc est alors différent. Cette légère différence est amplifiée par les effets non-linéaires en cascade ce qui conduit à des continums très différents à des puissances plus élevées entre les deux polarisations. Afin de mesurer la dépendance de la polarisation du continuum, nous avons mesuré le spectre en fonction de la polarisation du faisceau incident à 1064 nm, pour une puissance couplée fixe de 120 mW (fig. 3-10).

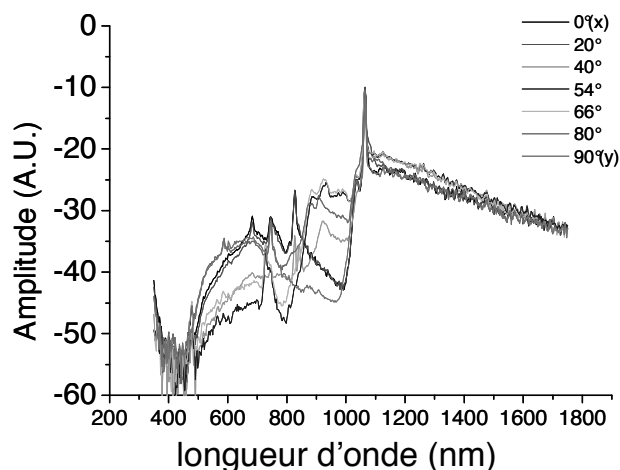


Figure 3-10. Spectres des supercontinuuums en fonction de la polarisation.

Pour les applications, nous avons aussi étudié la génération de supercontinuuums sur des fibres plus longues. Ainsi, les spectres observés sont beaucoup plus larges et permettent d'adresser un plus grand nombre de fluorophores. Cependant, comme le montre la figure 3-11, même si pour les fibres plus longues, les spectres sont plus uniformes le continuum reste fortement dépendant de la polarisation et que les longueurs d'onde courtes dans le bleu sont accessibles jusqu'à 450 nm.

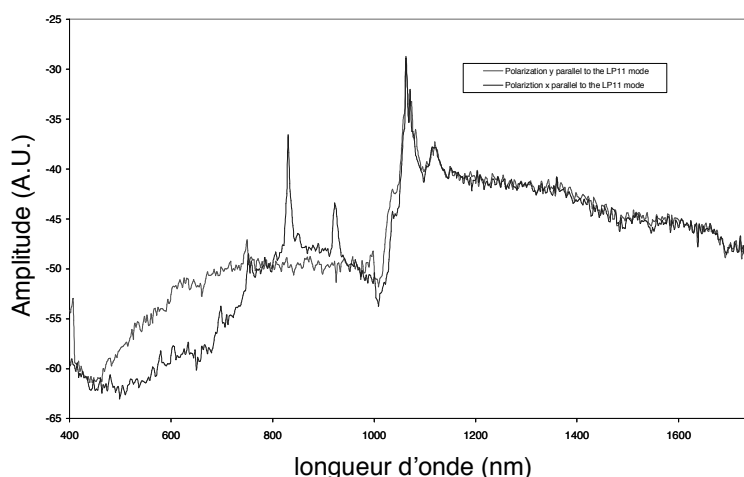


Figure 3-11. Spectres de continuums pour une fibre de 4m.

L'utilisation de fibres à cristal photonique biréfringentes pour la microscopie en polarisation a montré certaines limitations. Cependant, nos études sur la formation de supercontinuuums dans les fibres très biréfringentes et sur le couplage intermodal, nous permettent d'envisager une nouvelle approche pour la génération de continuums visibles appliquée à la microscopie. Ainsi, contrairement à ce qui est fait actuellement nous pouvons imaginer le design de fibres spécifiques pour optimiser les longueurs d'onde visible des pics pour s'accorder aux spectres d'absorption des fluorophores.

5. Encadrement

Les travaux sur les oscillateurs à cavité décamétriques ont été engagés lors du stage de 9 mois de Dimitris Papadopoulos dans le cadre du programme Marie Curie puis poursuivis par Jean-Charles Guffond en stage d'école d'ingénieur puis par Christoph Gerhard lors de son stage de diplomabeirt.

Les travaux sur le laser picoseconde à 914 nm ont été réalisés par Pierre Blandin lors de son stage de Master.

Les travaux sur la génération de supercontinuum picoseconde dans les fibres biréfringentes ont été réalisés avec Pierre Blandin lors de sa thèse.

Les travaux sur les amplificateurs 3D ont été réalisés par Jérôme Gouya dans le cadre de sa thèse puis par Christoph Gerhard lors de son stage de diplomabeirt.

Jérôme Gouya	Doctorant	80 %		2003-2005
Dimitris Papadopoulos	Doctorant Marie Curie	10 %	1 article	2003
Jean-Charles Guffond	stage ESO 3	100 %		Mai-septembre 2003
Pierre Blandin	stage ESO 3	80 %	1 article	Mai septembre 2005
Christoph Gerhard	stage de DIPLOMARBEIT	100 %	1 article	Mars-août 2006
Pierre Blandin	Doctorant	30 %		2005-...

6. Publication et communication

Articles

- a[24] D. N. Papadopoulos, S. Forget, F. Druon, F. Balembois and P. Georges, "Passively mode-locked diode-pumped Nd:YVO₄ oscillator operating at ultra-low repetition rate" **Optics Letters** Vol. 28, 1838-40, (2003)
- a[40] P. Blandin, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, S. Lévêque-Fort, M.P. Fontaine-Aupart, "Diode-pumped passively mode-locked Nd:YVO₄ laser at 914 nm," **Optics Letters** Vol. 31, 214-216 (2006)
- a[44] Sébastien Forget, Frédéric Druon, François Balembois, Patrick Georges, Nicolas Landru, Jean-Philippe Fève, Jiali Lin and Zhiming Weng "Passively Q-switched diode-pumped Cr⁴⁺:YAG/Nd³⁺:GdVO₄ monolithic microchip laser" **Optics Communications**, Volume 259, Issue 2, 15 March 2006, Pages 816-819 (2006)
- a[46] Ch. Gerhard, F. Druon, P. Georges, V. Couderc, "Stable mode-locked operation of a low repetition rate diode-pumped Nd:GdVO₄ laser by combining quadratic polarisation switching and a semiconductor saturable absorber mirror", **Opt. Express** 14, 7093-7098 (2006), <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=oe-14-16-7093>

Conférence invitée

- ci[10] F. Balembois, S. Forget, D. Papadopoulos, F. Druon, P. Georges, "Lasers solides pompés par diode émettant des impulsions picosecondes à haute cadence dans l'ultraviolet" **Conférence Invitée – Colloque UVX 2004**, St Etienne (7-11 Juin 2004)

Conférences avec publications d'actes

- ca[17] S. Forget, F. Balembois, F. Druon, P. Georges, "Diode-pumped sub-ns ultraviolet laser system operating at 1 MHz", **Advanced Solid State Photonics 2003**, 2-5 february 2003, San Antonio, USA. Publié dans : OSA Trends in Optics and Photonics Vol. 83, *Advanced Solid State Lasers*, John Zaybowski, ed. (Optical Society of America, Washington, DC 2003), pp. 369-372.
- ca[30] P. Blandin, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, S. Lévêque-Fort, M.P. Fontaine-Aupart, "Laser Nd:YVO₄ impulsionnel à 914 nm pompé par diode", Poster : **COLOQ 9**, Dijon, Septembre 2005
- ca[32] J. Didierjean, F. Balembois, F. Druon, P. Georges, J. Petit, P. Goldner, B. Viana, "Temperature measurements on Nd doped vanadate crystals: Comparative study of Nd:GdVO₄ and Nd:YVO₄, and test of a composite Nd:YVO₄/YVO₄ rod using a new method of bonding.", Poster : **Advanced Solid State Photonics (ASSP)** (Lake Tahoe, février 2006)
- Publications des actes en cours
- ca[35] P. Blandin, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, S. Lévêque-Fort, M.P. Fontaine-Aupart, "914 nm diode-pumped passively mode-locked based on Nd:YVO₄", Conférence orale : **Advanced Solid State Photonics (ASSP)** (Lake Tahoe, février 2006) Publications des actes en cours
- ca[41] P. Blandin, F. Druon, M. Hanna, S. Lévêque-Fort, C. Lesvigne, V. Couderc, P. Leproux, P. Georges, "Supercontinuum generation in a highly birefringent photonic crystal fiber seeded by a low-repetition rate picosecond infrared laser" **SPIE European Symposium on Optics and Optoelectronics**, 16 through 19 April 2007 at the Congress Ctr., Prague, Czech Republic. (2007)

Conférences sans publications d'actes

- c[26] S. Forget, G. Lucas-Leclín, F. Balembois, F. Druon, P. Georges, "Compact sub-ns tunable laser system operating at 1 MHz", **CLEO 2003**, Baltimore, US, 1-6 June 2003
- c[29] S. Forget, F. Balembois, F. Druon, G. Lucas-Leclín, P. Georges, "Diode-pumped sub-ns ultraviolet laser system operating at 1 MHz", **CLEO-Europe 2003**, Munich, Germany, 22-27 June 2003
- c[59] P. Blandin, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, S. Lévêque-Fort, M.P. Fontaine-Aupart, "Impulsions picoseconde à 914 nm à partir d'un laser Nd:YVO₄ pompé par diode", Poster: **Journées Nationales des Cristaux pour l'Optique (JNCO)** Valpré-Ecully (12-14 déc. 2005)
- c[60] J. Didierjean, F. Balembois, F. Druon, P. Georges, J. Petit, P. Goldner, B. Viana, "Temperature measurements on Nd doped vanadate crystals: bulk crystals (Nd:GdVO₄ and Nd:YVO₄) and composite rods using a new method of bonding." Poster: **Journées Nationales des Cristaux pour l'Optique (JNCO)** Valpré-Ecully (12-14 déc. 2005)
- c[62] P. Blandin, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, S. Lévêque-Fort, M.P. Fontaine-Aupart, "First picosecond Nd:YVO₄ diode pumped solid state laser at 914 nm" Oral : **Conference on Laser and Electro-Optic (CLEO)**, Long Beach (May 2006)
- c[66] Ch. Gerhard, F. Druon, P. Georges, "Dual-mode-locking technique: quadratic polarisation switching and a semiconductor saturable absorber mirror for ultra-stable mode-locked operation at low repetition rate of a diode-pumped Nd:GdVO₄ laser" **EOS Meeting**, Paris (Octobre 2006)
- c[69] P. Blandin, F. P. J. Druon, M. Hanna, C. Lesvigne, P. Leproux, V. Couderc, M. Fontaine-Aupart, P. M. Georges, "Supercontinuum generation in a highly birefringent photonic crystal fiber seeded by a low-repetition rate picosecond infrared laser" **SPIE European Symposium on Optics and Optoelectronics**, 16-19 April 2007, Prague, Czech Republic
- c[73] P. Blandin, F. Druon, M. Hanna, S. Lévêque-Fort, M.P. Fontaine-Aupart, C. Lesvigne, V. Couderc, P. Leproux, P. Georges "Supercontinuum generation in a highly birefringent photonic crystal fiber seeded by a low-repetition rate picosecond infrared laser" **CLEO/Europe 2007**, 17-22 June 2007 Munich, Germany.

Applications

1. Introduction

L'expertise acquise sur les sources impulsionnelles pompées par diode nous a permis de développer des applications avec ce type de sources. Ainsi, nous avons exploité notre source picoseconde amplifiée pour faire des expériences de micro-usinage. Notre savoir-faire nous a aussi servi pour l'utilisation d'une source supercontinuum picoseconde en microscopie. J'ai aussi participé à l'élaboration d'une source femtoseconde à 1.5 μm à base de Cr^{4+} :YAG pour des applications en spectroscopie.

2. Cadre d'étude et collaborations

Ces multiples applications sont faites en étroite collaboration avec des laboratoires à la pointe de la technologie dans chacune de leur spécialité. Ainsi, nous collaborons avec l'équipe de Marie-Pierre Fontaine-Aupart et Sandrine Lévêque-Fort du LPPM pour les applications en microscopie FLIM (fluorescence lifetime imaging microscopy) et TIRF (Total Internal Reflection Fluorescence). Nous collaborons aussi avec l'équipe de Guy Guelachvili et Nathalie Picqué du LPPM pour la réalisation d'une source femtoseconde à base de Cr :YAG pour leurs applications en spectroscopie.

Pour les applications de micro-usinage nous travaillons avec l'entreprise Thalès à travers un financement ASTRE de l'Essonne.

3. Micro-usinage

A. Contexte

Les travaux sur le micro-usinage sont partis d'un constat simple : certains industriels tel LUMERA en Allemagne développent des sources picoseconde de quelques dizaines de microjoules et de l'ordre du Watt moyen pour ce type d'applications. Leurs systèmes sont eux aussi basés sur l'utilisation de cristaux dopés au néodyme pompés par diode (optimale en termes de Performance/coût). Cependant, leur système utilise un amplificateur régénératif qui est une technologie complexe et qui nécessite des modulateurs électro-optiques extrêmement performants (chers) pour atteindre des cadences multi kilohertz. Nous avons décidé de développer un système à l'architecture plus simple et directe et de la valider en procédant à des essais de micro-usinage sur différents matériaux.

B. Principaux résultats

Cette chaîne pour le micro-usinage est représentée figure 4-1. Nous avons utilisé la source amplifiée décrite dans le chapitre *source picoseconde* 4B.

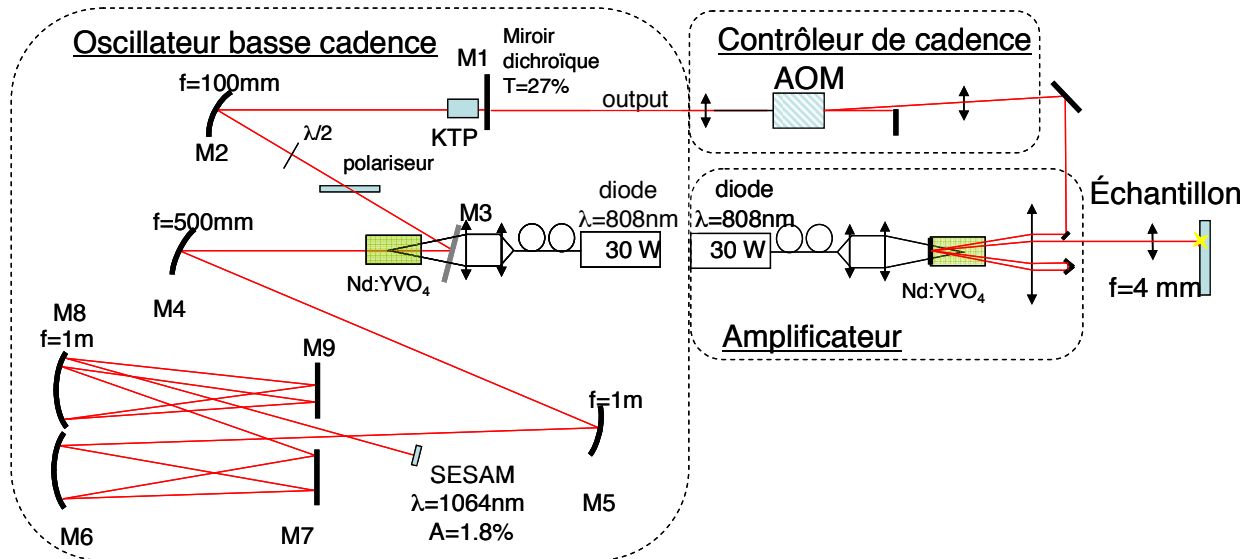


Figure 4-1. Chaîne picoseconde pour le micro usinage.

Nous focalisons le faisceau en sortie de l'amplificateur 3D en configuration 4 passages à l'aide d'une lentille asphérique de focale 8mm. La cible est positionnée sur une platine rotative comme le montre la figure 4-2.



Figure 4-2. Photographie du dispositif de micro-usinage. Le faisceau est focalisé 1mm avant la cible pour visualiser le plasma dans l'air (la cadence de répétition est de 10 kHz).

Sans échantillon, il faut noter que le faisceau est suffisamment énergétique pour créer un plasma dans l'air, comme le montre la figure 4-2, indiquant une puissance crête de l'ordre de 10^{14} W/cm². Ce phénomène se produit jusqu'à une cadence de 100 kHz (énergie de l'ordre de 9 μJ) et disparaît au delà car l'énergie n'est pas suffisante.

Plusieurs types d'échantillons ont été usinés : aluminium, cuivre, papier, verre. Plusieurs cadences ont été essayées : 1kHz, 10 kHz, 100 kHz, et 1 MHz.

Nous avons testé plusieurs cadences afin de trouver le bon compromis entre vitesse d'exécution et énergie par impulsion. En effet si la cadence est trop élevée l'énergie par impulsion est trop faible pour usiner le métal et, à contrario si la cadence est très faible, l'énergie par impulsion est maximale mais le nombre d'impacts par seconde est petit réduisant par conséquent la vitesse d'exécution de l'usinage. En modifiant la cadence l'énergie par impulsions varie entre 8 μJ et 70 μJ.

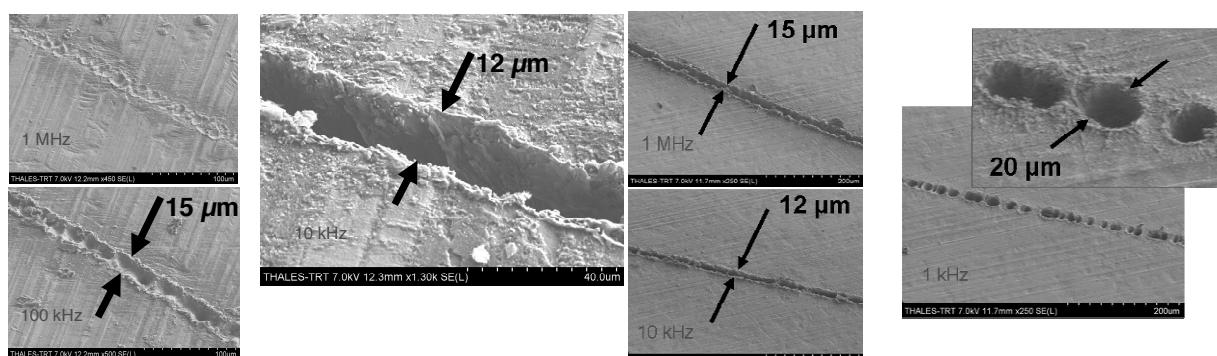


Figure 4-3. À droite usinage dans de Al et à gauche dans du Cu pour plusieurs cadence/énergie

Nous remarquons qu'à la fois pour l'aluminium et le cuivre la cadence optimale se situe vers 10 kHz ($\sim 50 \mu\text{J}$). Lorsque l'énergie est supérieure à cette valeur la gravure est fine et propre, c'est-à-dire, qu'il y a peu de bourrelets sur ses bords. Nous avons fait des tests sur ces deux métaux car le comportement à haute cadence n'est pas le même dans les deux cas. Dans le cas de l'Al qui est un métal dur, à haute cadence on n'observe quasiment pas les impacts car l'énergie est trop faible (fig. 4-3). En revanche sur le cuivre qui est plus mou on observe un sillon large avec des gros bourrelets latéraux. Ceci montre que le micro-usinage ne se fait plus par explosion Colombienne mais par évaporation thermique ce qui est corroboré par le fait qu'à haute cadence la puissance moyenne en sortie de l'amplificateur est plus élevée.

La deuxième démonstration de micro-usinage a été effectuée sur du papier. Cette expérience a été réalisée sur du papier standard de 80 g/m^2 . La précision du découpage a été mesurée à $19 \mu\text{m}$ en étudiant une découpe partielle (fig. 4-4) avec des bords très raides de moins de $2 \mu\text{m}$ d'épaisseur.

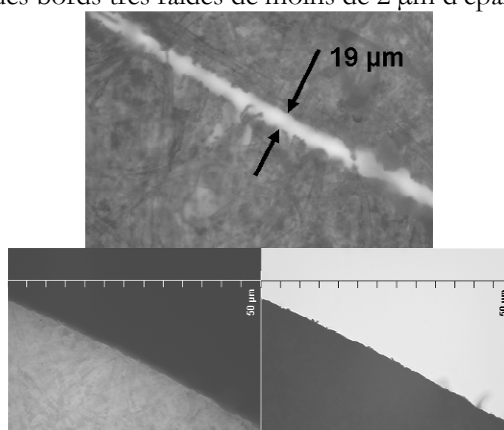


Figure 4-4. Découpe de papier.

La troisième démonstration de micro-usinage a été effectuée sur du verre. Dans le but de faire de la gravure sur verre visible, nous avons étudié le marquage à un taux de répétition de 10 kHz. À des énergies de $50 \mu\text{J}$, la taille d'un impact isolé est de l'ordre de $50 \mu\text{m}$ (cf. fig. 4-5). Néanmoins, afin d'observer une gravure sans bavure, le processus a été étudié pour différentes vitesses de translation de l'échantillon. En fait, en abaissant la vitesse de translation, un transfert des contraintes entre deux impacts voisins se produit. Ceci mène à une ligne plus étroite et connexe avec une meilleure qualité de la gravure comme représentée sur les photographies figure 4-5.

En effet, la technique de microscopie TIRF permet d'obtenir une résolution axiale sub-longueur d'onde, tout en acquérant des images en champ large. En utilisant un objectif à grande ouverture numérique (par exemple Olympus TIRFM 1,45), on peut exciter l'échantillon avec un angle supérieur à l'angle critique à l'interface lamelle/échantillon. Ainsi on va créer un champ évanescent à cette interface, avec une faible profondeur de pénétration (environ de 30 à 300 nm). Avec ce dispositif, on va pouvoir exciter les fluorophores uniquement à proximité de l'interface, et s'affranchir de toute autre fluorescence. Cette technique permettant l'observation de phénomènes proches d'une interface, est particulièrement adaptée au suivi de processus membranaires.

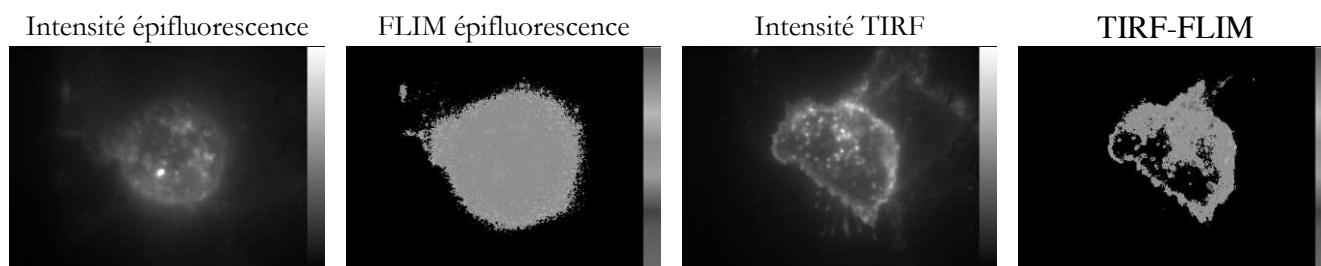


Figure 4-7. Cellules HEK avec CB1R marqués à la GFP I.

L'originalité de notre dispositif réside dans l'association de cette technique de TIRF à de la mesure de durée de vie de fluorescence (FLIM). Nous réalisons ainsi des mesures de durées de vie en plein champ, sans avoir à balayer l'échantillon, avec une résolution axiale sublongueur d'onde. Ceci nous permet d'obtenir une carte de durée de vie sur un champ d'environ $100 \times 100 \mu\text{m}^2$ en des temps plus courts que ceux nécessaires avec, par exemple, un dispositif biphotonique (environ 10 à 30 s contre plusieurs minutes). Ce temps d'acquisition court est indispensable pour imager des récepteurs membranaires et leurs voies de signalisation en dynamique, car le cycle de tels récepteurs est une succession de passage à la membrane et d'internalisation, chaque étape n'excédant pas quelques minutes. Pour réaliser ces mesures de durée de vie, nous utilisons un intensificateur rapide (HRI Kentech Instruments) couplé à une caméra CCD (Orca AG Hamamatsu), qui nous permet d'échantillonner le déclin de fluorescence avec des « portes temporelles » de 200 ps à 1 ns, à différentes durées après l'impulsion. D'autre part, le microscope développé nous permet également d'observer l'échantillon en TIRF classique à cadence vidéo. Ce dispositif a permis d'obtenir des premières images avec des cellules HEK, cellules modèles permettant de valider la technique avant de l'appliquer à des neurones. Nous avons ainsi imagé d'une part une cellule dont les récepteurs CB1R ont été marqués à la GFP. Plusieurs images en fonction de la technique ont été prises (figure 4-7). D'autre, part afin de mettre à profit le FLIM nous avons fait quelques images de cellule HEK transfectées avec AKAR CFP/YFP pour faire du FRET qui pourrait à terme permettre la visualisation de l'interaction AKAR avec l'AMP cyclique (représentatif de l'activité avec le récepteur CB1R).

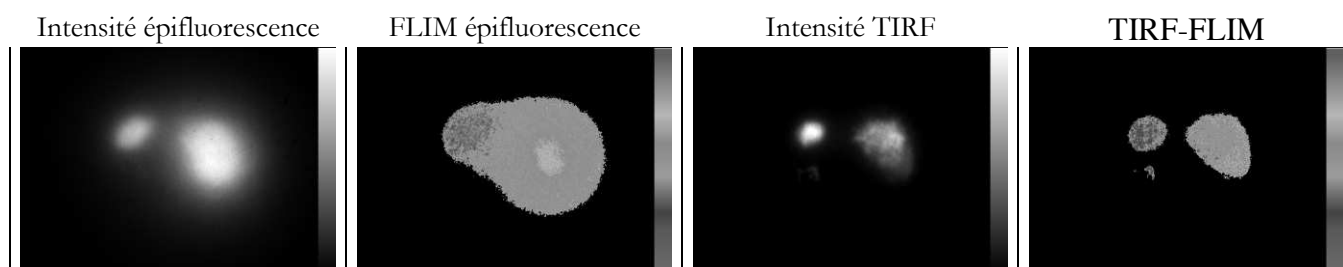


Figure 4-8. Cellules HEK transfectées avec AKAR CFP/YFP, but : visualisation grâce au FRET de l'interaction AKAR avec AMP cyclique (représentatif de l'activité avec le récepteur CB1R).

5. Spectrométrie

A. Contexte

Depuis 2004, nous collaborons avec Nathalie Picqué et Guy Guelachvili du LPPM sur l'élaboration d'une source femtoseconde à $1.5 \mu\text{m}$ à spectre large pour des applications de spectroscopie d'absorption

ultrasensible à haute résolution spectrale et à très large domaine spectral. Ce projet s'inspire des progrès très récents faits dans le domaine des peignes de fréquences réalisés à partir des lasers femtoseconde pour les applications en métrologie. Le but ici est d'avoir un système de spectroscopie équivalent en terme de bruit aux meilleurs existant actuellement mais avec une très grande gamme spectrale. L'objectif est de disposer d'une source avec un domaine spectral centré vers 1500 nm et de largeur 100 nm correspondant à 10^5 éléments spectraux enregistrés simultanément. Cette source devra à terme être couplée à une cavité de détection accordée. La limite de résolution spectrale de ce système final sera la largeur Doppler des transitions observées et la sensibilité obtenue sera limitée par le bruit de grenaille. Ce système devrait avoir une sensibilité proche de la limite fondamentale de détection comme celle de la méthode la plus efficace à l'heure actuelle (nommée NICE-OHMS), utilisée en métrologie à 1.064 μm sur de très faibles domaines spectraux (10^{-4} nm).

B. Principaux résultats

Pour réaliser la source femtoseconde dans la gamme 1.4-1.6 μm , nous nous sommes orientés vers l'utilisation d'un oscillateur $\text{Cr}^{++}:\text{YAG}$. Nous avons donc été confrontés aux problèmes classiques des ce type de matériaux dopés aux ions Cr^{++} : problèmes thermiques, de déclin du temps fluorescence avec la température et l'existence de multiples états excités qui provoquent absorptions et désexcitations délétères. L'obtention du verrouillage des modes est donc dans ce cristal particulièrement critique. Néanmoins, grâce à l'utilisation d'un SESAM et de miroirs « chirpés » spécialement conçus, nous avons réussi à obtenir des impulsions de 54 fs avec 46 nm de bande (figure 4-10).

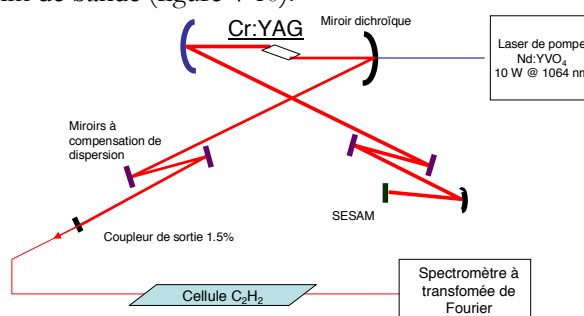


Figure 4-10 : schéma expérimental de l'oscillateur femtoseconde à base de Cr:YAG pour les applications de spectrométrie.

Ces performances ont permis de réaliser une première expérience de spectroscopie en propageant le faisceau dans une cellule d'acétylène. La figure 4-11 montre les différentes raies de l'acétylène.

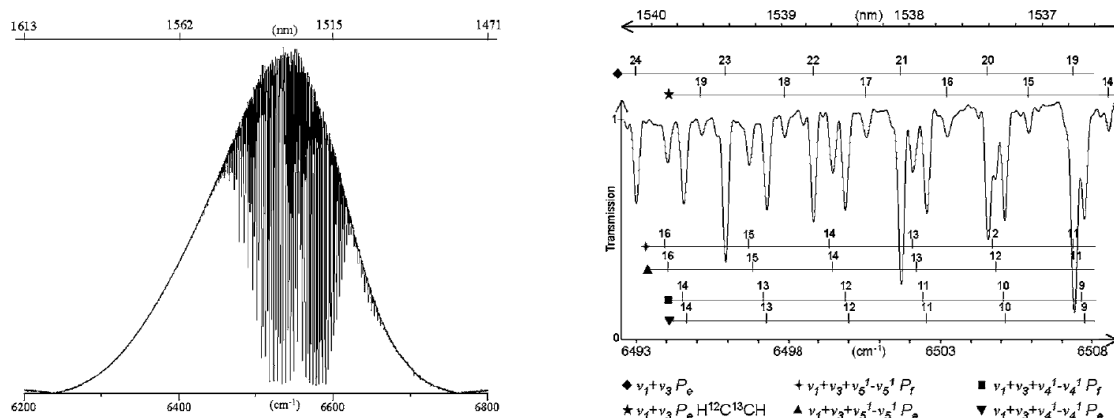


Figure 4-11. Spectre relevé après la cellule d'acétylène. A gauche : spectre total, on remarque les raies du C_2H_2 dans l'enveloppe du spectre du laser à base de Cr:YAG émettant autour de $1.5 \mu m$. A droite zoom sur une partie du spectre avec l'identification des raies.

Ce type de laser, encore peu développé, n'avait jamais été utilisé pour faire de la spectroscopie. Les premiers résultats sont très encourageants et ce travail se poursuit.

6. Encadrement

Les travaux sur le microusinage ont été engagés lors du stage de Christoph Gerhard puis poursuivis par P. Blandin.

Christoph Gerhard	stage de DIPLOMARBEIT	100 %	1 article	Mars-aout 2006
Pierre Blandin	Doctorant	30 %		2005-...

7. Publication et communication

Articles

- a[49] J. Mandon, G. Guelachvili, N. Picqué, F. Druon, and P. Georges, "Femtosecond laser Fourier transform absorption spectroscopy," *Opt. Lett.* **32**, 1677-1679 (2007)
- a[54] Ch. Gerhard, F. Druon, P. Blandin, M. Hanna, F. Balembois, P. Georges, F. Falcoz, "Efficient versatile-repetition-rate picosecond source for material processing applications" *Applied Optics*, sous presse

Conférences sans publications d'actes

- c[68] P. Blandin, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, S. Lévêque-Fort, M.P. Fontaine-Aupart, "Instrumental development for Fluorescence Lifetime Imaging Microscopy (FLIM) ", Poster : **Ecole d'été Nanobio** Cargèse (17-29 juillet 2006)
- c[70] P. Blandin, S. Leveque-Fort, F. Druon, M. Hanna, P. Georges, R. Briandet, Z. Lenkei, M.P. Fontaine-Aupart, "Fluorescence lifetime imaging in TIRF microscopy" **Focus On Microscopy Conference** (April 10-13, Valencia, Spain) 2007
- c[72] P. Blandin, S. Lévêque-Fort, F. Druon, M. Hanna, P. Georges, R. Briandet, Z. Lenkei and M.P. Fontaine-Aupart "Development of a TIRF-FLIM microscope for biomedical applications." **European Conference on Biomedical Optics**, 17-21 June 2007 Munich, Germany.

Nouvelles activités et perspectives

1. Introduction

Les premières parties de ce chapitre seront consacrées à deux nouvelles activités qui viennent juste de démarrer. D'une part, au LCFIO, nous commençons un nouveau projet de source fs à 1.6 μm amplifiée pour des applications de greffe de cornée (projet GRECO). D'autre part, je participe depuis le début au grand projet, porté par G. Mourou, ELI de laser de classe exawatt dont une partie des études commence à se mettre en place dans le cadre du projet ILE (Institut de la Lumière Extrême). La troisième partie de ce chapitre sera consacrée aux évolutions des différentes activités déjà présentées.

2. GRECO

A. But des travaux

Sur ces trois dernières années le laser femtoseconde est devenu un outil chirurgical innovant dans le domaine de la chirurgie réfractive et tout particulièrement du LASIK⁷. Malgré leur coût, ces techniques s'imposent progressivement mais restent limités au domaine de la chirurgie réfractive de confort. Nous nous proposons d'étendre cette technologie au domaine de la greffe de cornée et l'utilisation de cette technologie pourrait aboutir à terme au développement d'une technique de greffe automatisée par laser à impulsions ultra-brèves. 40.000 greffes sont faites annuellement aux EU et les chiffres sont équivalents en Europe. L'application de la technologie laser femtoseconde se heurte actuellement à plusieurs limitations: en effet, la qualité de la découpe décroît rapidement lorsque le tissu cornéen est pathologique. Ce phénomène est principalement dû à deux facteurs :

- les œdèmes et autres défauts présents dans la cornée donnent lieu à une forte diffusion (et donc : atténuation) du faisceau laser
- les déformations de la surface de la cornée (kératocônes, ...) contribuent à l'élargissement de la fonction d'appareil et donc de la tache focale du faisceau et baissent ainsi la densité de puissance.

L'apparition d'effets secondaires – surtout thermiques – limite la compensation de cette baisse d'intensité par une simple augmentation de l'énergie. Par contre, la nature des phénomènes physiques limitant les performances des systèmes actuels permet de les contourner par des solutions technologiques « sur mesure ». Il est connu que l'intensité du phénomène de diffusion dépend de la longueur d'onde λ comme $1/\lambda^4$. La diffusion peut donc être considérablement réduite en utilisant un laser travaillant à une longueur d'onde plus importante que les 1,06 μm utilisés dans les systèmes actuels. Ainsi, nous souhaitons développer un système basé sur un laser femtoseconde innovant avec un spectre d'émission centré autour de 1,6 μm avec la perspective de réduire les effets de la diffusion optique par un facteur 5.

B. Collaborations

Les travaux sur les lasers à 1.6 μm pour la chirurgie de l'œil sont font dans le cadre de l'ANR GRECO avec comme partenaires : le LOA, le LBO laboratoire de la biologie de l'œil de l'hôtel Dieu et la société ImagineEye. Nous travaillons aussi en collaboration avec la société Amplitude Systèmes à travers le financement de la bourse de thèse de Franck Morin.

C. Du laser à 1.6 μm pour la greffe de la cornée

Pour réaliser industriellement une source laser à 1.6 μm pour la greffe de cornée, il faut répondre à certains critères tel que :

⁷Laser *in situ* keratomileusis.

- la fiabilité, car sont visées des applications médicales, il faut donc un système robuste avec des performances récurrentes ;
- la haute cadence (≈ 100 kHz) pour avoir des temps opératoires raisonnables ;
- le coût, il faut donc un système très efficace et avec peu de maintenance.

La voie la plus prometteuse pour ce type de systèmes est donc de partir de sources d'impulsions femtoseconde à base de fibres amplificatrices haute cadence et de forte puissance moyenne. En effet, l'utilisation des fibres est particulièrement adaptée à la forte puissance moyenne en raison de la meilleure répartition de la chaleur sur toute la longueur de la fibre, ce qui réduit fortement les problèmes thermiques. Il est ainsi facile d'augmenter la cadence de ces sources jusqu'au 100 kHz voire 1 MHz. On peut rappeler que cette montée en cadence est loin d'être évidente sur les systèmes « classiques actuels » utilisant non pas des fibres mais des cristaux amplificateurs beaucoup plus sensibles aux problèmes thermiques. De plus les systèmes fibrés sont excessivement intéressants en vue de la réalisation de produits potentiellement commercialisables, car ces systèmes sont robustes et utilisent des composants télécoms à relativement bas coûts et surtout très facilement maniables et connectables les uns aux autres.

Notre but est de réaliser une source femtoseconde dans la gamme de longueur d'onde autour de $1,6 \mu\text{m}$ qui correspond à une fenêtre de transparence de la cornée. L'utilisation de grandes longueurs d'onde permet de diminuer l'influence de la diffusion des tissus, ce qui est particulièrement crucial pour les cornées pathologiques. L'énergie des impulsions doit se situer autour de $5 \mu\text{J}$ et leur durée autour de 500 fs pour les applications de chirurgie.

Or, la technologie issue des lasers télécoms utilise des fibres amplificatrices dopées à l'erbium qui peuvent émettre autour de $1,55 \mu\text{m}$. Ces systèmes sont très éprouvés et robustes ce qui est un avantage certain pour notre application. De plus, il a été montré, d'une part, que ces systèmes sont adaptés à la réalisation d'impulsions femtosecondes et d'autre part, que leur gamme d'émission peut s'étendre jusqu'à $1,63 \mu\text{m}$. Cependant, bien que les systèmes à base de fibres dopés à l'erbium émettant proche de $1,55 \mu\text{m}$ soient bien maîtrisés, il excite un véritable challenge scientifique dans la réalisation d'une source femtoseconde à $1,6 \mu\text{m}$ énergétique (fig. 5-1). Le projet consiste donc à réaliser cette source pour nos applications en chirurgie et afin qu'il devienne à terme un produit commercialisable

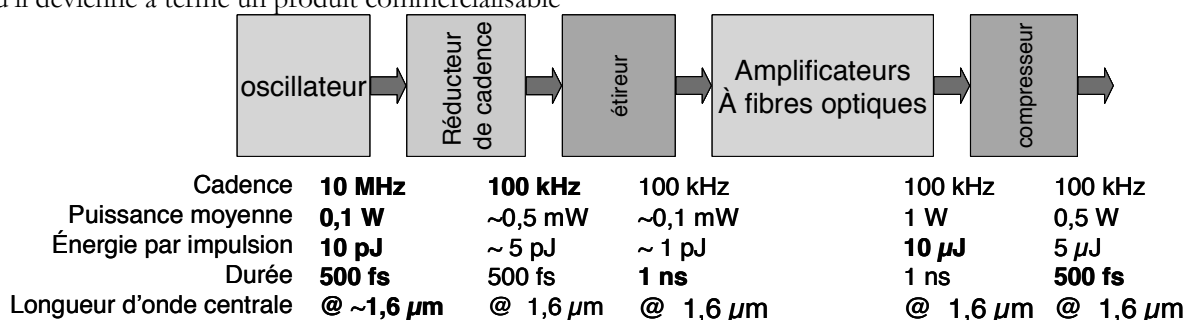


Figure 5-1. Schéma et performance de la source en vue d'un produit potentiellement commercialisable

3. ILE

A. But des travaux

Le programme ILE (Institut de la Lumière Extrême) est un programme de développement d'un laser ultra-intense dont l'objectif est la mise au point d'un laser produisant des impulsions de 15 fs avec une énergie de 300 J, donc de puissance crête égal à 20 PW à la cadence de 1 tir par minute.

Le laser est composé de trois parties distinctes (Fig. 5-2) :

- un pilote qui permet de produire des impulsions de l'ordre de 10 fs vers 800 nm, d'énergie de 100 mJ environ et à la plus haute cadence possible. À pleine énergie, le but est d'arriver à une cadence de 1 à 10 Hz. À plus faible énergie (de 1 à 10 mJ), le but est de passer à une cadence de 10 à 100 Hz. Cette variation dans les cadences est directement liée au laser de pompe et aux problèmes thermiques dans les étages finaux de ce laser de pompe.
- un étage amplificateur de puissance pour passer à une énergie de l'ordre de 480 J à la cadence de 1 tir par minute,
- un compresseur produisant des impulsions de 15 fs avec une énergie de 300 J (20 PW).

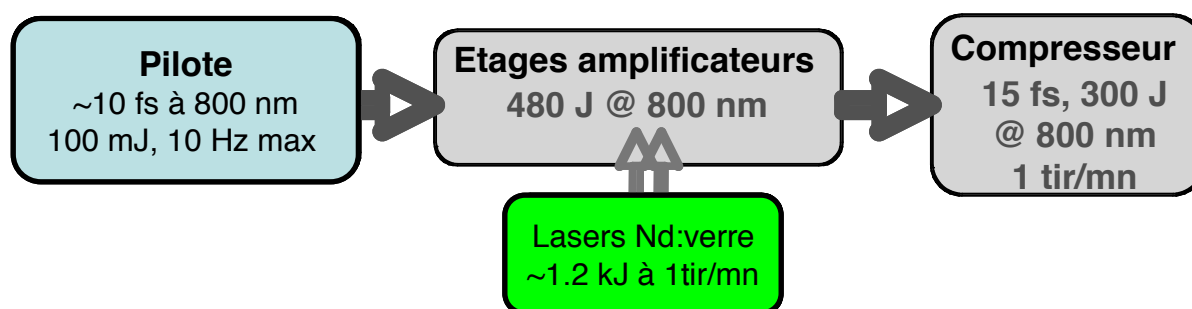


Figure 5-2 : schéma de principe de la source ILE-CPER

Mon travail dans ce projet concerne en particulier le pilote du laser ILE-CPER.

B. Collaborations

Le programme ILE (Institut de la Lumière Extrême) est un programme de développement d'un laser ultra-intense qui vient d'être sélectionné dans le cadre du prochain contrat Plan Etat Région. Plus particulièrement, le développement du pilote ILE-CPER sera réalisé sous la responsabilité du LCFIO en collaboration avec le LOA, le LULI, le CEA Saclay et la société FASTLITE.

C. Réalisation du « front-end »

L'idée directrice du pilote de ILE est de produire les impulsions les plus brèves possibles typiquement 10 fs à la cadence la plus élevée possible et avec une énergie par impulsion de l'ordre de 100 mJ. Le principal objectif est d'éviter au maximum le phénomène de rétrécissement spectral par le gain qui est présent dans tout amplificateur à base de saphir dopé au titane. Il faut donc passer par des processus d'amplification à base d'optique non linéaire, beaucoup plus large bande. Néanmoins, il ne faut pas négliger les progrès effectués avec les lasers à base de Saphir dopé au Titane, par exemple les amplis régénératifs avec formatage de la courbe de gain dans la cavité régénérative (voir les travaux récents d'Amplitudes Technologies avec Fastlite).

En partant d'une source Ti:Saphir délivrant des impulsions de 30 fs avec une énergie de 0,5 mJ à 1 kHz, la bande spectrale est élargie par effet non linéaire dans un gaz d'argon pour obtenir des impulsions de moins de 10 fs. Il sera néanmoins nécessaire de bien contrôler cet élargissement spectral en termes de modulation de phase, d'homogénéité spatiale de l'élargissement et de contraste des impulsions produites. Pour cela les impulsions seront nettoyées par la technique XPW (cross-polarized wave).

Ces impulsions seront ensuite amplifiées dans des cristaux non linéaires par amplification paramétrique optique (en régime d'OPCPA). Pour cela, il est donc nécessaire de développer un laser spécifique qui fournira les impulsions de pompe pour les différents étages d'amplification paramétrique optique.

Ce laser de pompe est basé sur une deuxième source d'impulsions courtes à 1030 nm. Pour réduire au minimum les problèmes de gigue temporelle entre les impulsions de pompe et les impulsions signal à amplifier et compte tenu du fait que le processus d'amplification paramétrique optique est un effet non linéaire instantané, les impulsions signal et pompe doivent être parfaitement synchronisées à l'aide d'un dispositif électronique qui lie les deux oscillateurs femtosecondes à base de Ti:Saphir et Yb:KGW. Le laser de pompe sera donc un laser basé sur la technologie d'amplification à dérive de fréquence pour pouvoir partir d'un oscillateur femtoseconde à base d'Yb:KGW synchrone avec le laser à saphir dopé au titane. Différents amplificateurs à base de cristaux d'Yb:KGW puis d'Yb:YAG pompés par diode seront développés pour atteindre une énergie de 1 Joule à 515 nm après compression et doublement de fréquence. Ces impulsions serviront d'impulsions de pompe des cristaux non linéaires pour produire des impulsions de 100 mJ à 800 nm avec une bande spectrale correspondant à des impulsions de 10 fs (càd : 70 nm).

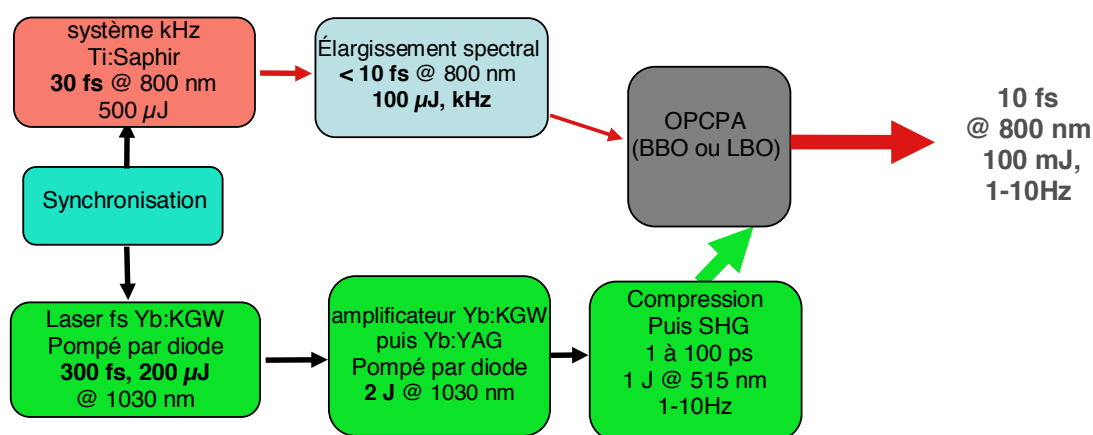


Figure 5-3. Schéma de principe du pilote de la source ILE-CPER

La cadence de ce laser de pompe sera progressivement réduite de 1 kHz (cadence de l'amplificateur régénératif Yb:KGW) à moins de 10 Hz pour l'étage final d'amplification haute énergie (2 J à 1030 nm) à base d'Yb:YAG pompé par diode. Tenant compte des phénomènes de rétrécissement spectrale par le gain dans ces amplificateurs et aussi de la bande spectrale réduite de l'Yb:YAG des étages haute énergie, il sera nécessaire de dimensionner l'étireur après l'oscillateur fs Yb:KGW en tenant compte du spectre final des impulsions de pompe (de l'ordre de 2 à 3 nm).

Ce faisceau à 515 nm sera envoyé de manière synchrone dans un cristal non linéaire judicieusement taillé afin d'amplifier une impulsion à spectre large sans rétrécissement par le gain.

4. L'avenir des autres activités

A. Lasers femtoseconde à base de cristaux dopés à l'ytterbium

L'activité sur les nouveaux cristaux lasers se poursuit dans le cadre de la thèse actuelle de Justine Boudeile. Les cristaux à plus fort potentiel qui sont actuellement dans notre ligne de mire sont l'Yb:CALGO et l'Yb:CaF₂. Cette activité de recherche sera prolongée par des travaux sur la très forte puissance (>100W) utilisant de nouvelles architectures laser de type Thin-disk, par exemple.

B. Fibres

L'activité sur les amplificateurs à fibres dopées aux ions ytterbium se poursuit dans le cadre de l'ANR Hipolyff avec les travaux de Dimitris Papadopoulos dans le cadre de son séjour post-doctoral. L'étude sur les préamplificateurs en régime parabolique arrivant à maturité, la seconde partie sur les amplificateurs aux impulsions ultrabrèves et de forte énergie (100 µJ) est sur le point de démarrer.

C. Lasers picoseconde basse cadence

L'activité sur les sources picosecondes et la génération de supercontinuum se prolonge actuellement par des applications en microscopie au LPPM dans le cadre de la thèse actuelle de Pierre Blandin.

Quant à la source picoseconde à cavité décimétrique, celle-ci est utilisée actuellement à l'ENS Cachan par l'équipe de François Treussard pour faire de l'excitation à deux photons des centres colorés N-V dans des nanocristaux de diamants. La durée de vie de l'état excité du centre NV étant supérieure à 10 ns, cette source basse cadence est en effet particulièrement bien adaptée pour réaliser de la microscopie FLIM avec ces nanocristaux.

5. Encadrement

Les travaux appliqués à la greffe de la cornée vont se dérouler en partie dans le cadre de la thèse de Franck Morin qui a débuté en octobre 2007.

Franck Morin	Doctorant	70 %	2007-...
Dimitris Papadopoulos	Post-doctorant	100 %	2008-...

6. Publication et communication

Conférences sans publications d'actes

- c[71] J. -P. Chambaret, F. Canova, R. Lopez-Martens, G. Chériaux, G. Mourou, A. Cotel, C. Le Blanc, F. Druon, P. Georges, N. Forget, F. Plé, and M. Pittman, " ILE 25PW Single Laser Beamline: The French Step for the European Extreme Light Infrastructure (ELI)," in **Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications Systems Technologies**, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2007), paper JWC4.

Conclusion générale

Depuis 2000, mes activités de recherche portent principalement sur les sources laser pompées par diode produisant des impulsions ultra-brèves. Ces travaux incluent plusieurs thématiques différentes : les architectures laser, les cristaux dopés aux ions ytterbium, les techniques de verrouillage de modes en phase et les effets non-linéaires et l'amplification dans les fibres. Depuis deux ans, j'ai eu l'opportunité de pouvoir élargir cet éventail vers des domaines plus applicatifs tels le micro-usinage, la spectrométrie, la microscopie... L'ensemble de ces travaux a abouti à des résultats très significatifs qui ont conduit, durant ces sept dernières années, à la publication de 44 articles et à 93 conférences dont 13 invitées.

Je souhaite souligner que ce travail n'a été possible que grâce à de fructueuses interactions avec des équipes de laboratoires experts en leur domaine : en cristallographie au LCAES de Paris, CIRIL de Caen et CEA-LETI de Grenoble, en biologie et spectrométrie au LPPM d'Orsay, en physique du laser et fibres optiques au Xlim de Limoges et LOA de Palaiseau. Ces collaborations m'ont aussi beaucoup apporté car elles m'ont permis d'accroître mon horizon scientifique.

Durant mes travaux, j'ai fortement été impliqué dans la gestion de l'activité de recherche conduite au sein de notre équipe sur les lasers aux impulsions ultra-brèves. Ceci m'a permis, en plus d'acquérir une expérience scientifique sur cette thématique, de participer aux différentes facettes de l'activité du chercheur : la réflexion pour cibler des axes de recherche pertinents, clairs et pérennes, la gestion d'une thématique, l'élaboration d'une structure de travail incluant collaborations et sources de financements et, bien entendu, l'encadrement d'étudiants en fin de second et troisième cycles.

Curriculum vitae

Frédéric DRUON

**Laboratoire Charles Fabry de l'Institut
d'Optique**
Tél. : 01 64 53 34 28

frederic.druon@institutoptique.fr
Date de naissance : 11/03/1972

FORMATION

- 2000 **Thèse de Doctorat en Sciences Physiques** (Université Paris Sud)
- 1996 **Ingénieur SUPELEC** (École Supérieure d'Électricité)
DEA Optique et Photonique (Institut d'Optique Paris XI) mention bien

EXPÉRIENCE PROFESSIONNELLE

- 2001-... **Chargé de recherche au CNRS**
Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique, Université de Paris XI
- 2001 **Post doctorat** (financement de la Société de Secours des Amis des Sciences)
Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique, Université Paris XI
- 1998-2000 **Thèse de Doctorat en Sciences Physiques**
Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique, Université Paris XI
- 1996-1997 **Coopération service national aux USA**
Center for Ultrafast Optical Science, University of Michigan, USA
Statut «research visitor»
- 1995-1996 **Stage de DEA, de 4 mois**
Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique, Université Paris XI
- 1995,1994 **Stages de 1ère et 2ème années d'école d'ingénieurs**
Laboratoire d'Optique Appliquée, ENSTA - École Polytechnique

ENSEIGNEMENT

- 2001-... **TP et TD d'électronique** à l'Institut d'Optique Graduate School en 2ème année
- 1999-2000 **TP d'électronique** à l'Ecole Supérieure d'Optique en 2ème année
- 1998-2000 **TP d'optique** à l'IUT d'Orsay en 1ère année

PRIX

- 2005 **Prix Fabry de Gramont de la Société Française d'Optique**

Synthèse des encadrements

<i>Nom de l'étudiant</i>	<i>Niveau d'étude</i>	<i>Taux d'encadrement</i>	<i>Nombre d'articles publiés</i>	<i>dates</i>
Sébastien Chénais	Doctorant	30 %	8 articles	2000-2002
Pierre Raybaut	Doctorant	90 %	6 articles	2000-2003
Justine Boudeile	Doctorant	90 %	1 article	2005-...
Jérôme Gouya	Doctorant	80 %		2003-2005
Dimitris Papadopoulos	Doctorant Marie Curie	10 %	1 article	2003
Mathieu Jacquemet	Doctorant	20 %	4 articles	2002-2005
Andrea Lucca	Doctorant Marie Curie	100 %	2 articles	Nov 2003- av 2004
Florent Thibault	Doctorant CEA LETI	20 %	1 article	2003-2006
Pierre Blandin	Doctorant	30 %		2005-...
Yoann Zaouter	Doctorant CELIA	15 %	1 article	2005- ...
Franck Morin	Doctorant	70 %		2007-...
Mathieu Paurisse	Doctorant	30 %		2007-...
Dimitris Papadopoulos	Post-doctorant	40 %	1 article	2007
Jean-Charles Guffond	stage ESO 3	100 %		Mai-septembre 2003
Pierre Blandin	stage ESO 3	80 %	1 article	Mai septembre 2005
Christoph Gerhard	stage de DIPLOMARBEIT	100 %	1 article	Mars-aout 2006
Hugues Ntjam	stage de maîtrise d'ingénierie mathématique	100 %		Avril-juin 2003
Guillaume Debourg	Stage DEA onde et matière	100 %		Avril-juillet 2004
Yoann Zaouter	Stage Master	100 %	1 article	Avril-septembre 2005
Nicolas Sanner	stage ESO 3	100 %	1 article	Mai-septembre 2002

Liste des publications et conférences

54 articles, 2 chapitres de livre, 1 brevet,
41 conférences avec publication des actes,
76 conférences sans publication d'actes
dont 14 conférences invitées.

Liste des publications dans des revues internationales:

- a[1] F. Falcoz, F. Druon, F. Balembois, F. Kerboull, P. Georges, A. Brun, "Small-Signal gain investigations for a continuous-wave diode-pumped Q-switched Cr:LiSAF laser", **Optics Letters**, Vol. 21 No 16, pp. 1253-55, 1996
- a[2] F. Balembois, F. Kerboull, F. Druon, F. Falcoz, P. Georges, A. Brun, "Theoretical and experimental investigations of small-signal gain for a diode-pumped Q-switched Cr:LiSAF laser", **IEEE J. Quantum Electron**, Vol. 33 No 2, 269-278, 1997
- a[3] F. Balembois, F. Druon, F. Falcoz, P. Georges, A. Brun, "Performances of Cr:LiSAF and Cr:LiSGaF for cw diode pumped Q-switched operation", **Optics Letters**, Vol. 22 No 6, pp. 387-389, 1997
- a[4] J.C. Chanteloup, F. Druon, M. Nantel, A. Maksimchuk, G. Mourou, "Single shot wave front measurements of high-intensity ultrashort laser pulses using a three wave interferometer", **Optics Letters**, Vol. 23 No 8, pp. 621-623, 1998
- a[5] F. Druon, G. Chériaux, J. Faure, G. Vdovin, J.C. Chanteloup, J. Nees, M. Nantel, A. Maksimchuk, G. Mourou, "Wave-front correction of femtosecond Terawatt lasers using deformable mirrors", **Optics Letters**, Vol. 23 No 1, pp. 1043-45, 1998
- a[6] J. Nees, S. Biswal, F. Druon, J. Faure, M. Nantel, G. Mourou, A. Nishimura, H. Takuma, J. Itatani, J.C. Chanteloup, C. Hönninger, "Ensuring compactness, reliability and scalability for the next generation of high-field laser", **IEEE Invited paper Special issue on ultrafast Optics**, vol. 4, No 2, pp. 376-384, 1998
- a[7] F. Druon, F. Balembois, P. Georges, A. Brun, "High-repetition-rate pulsed ultraviolet source using diode-pumped a microchip laser and a multipass amplifier", **Optics Letters**, Vol. 24 No 7, pp. 499-501, 1999
- a[8] F. Druon, F. Augé, F. Balembois, P. Georges, A. Brun, A. Aron, F. Mougél, G. Aka, D. Vivien, "Efficient, tunable, zero-line diode-pumped, continuous wave Yb^{3+} :Ca₄LnO(BO₃)₃ (Ln=Gd,Y) lasers at room temperature and application to miniature lasers", **J. Opt. Soc. Am. B** Vol. 17, No 1, pp. 18-22, 2000
- a[9] F. Druon, F. Balembois, P. Georges, A. Brun, A. Aron, F. Mougél, G. Aka, D. Vivien, A. Courjaud, C. Hönninger, F. Salin, "90-fs pulse generation from a modelocked diode-pumped Yb^{3+} :Ca₄GdO(BO₃)₃ laser", **Optics Letters**, Vol. 25 No 7, pp. 423-425, 2000
- a[10] F. Augé, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, A. Brun, F. Mougél, G. Aka, D. Vivien, "Theoretical and experimental investigations of a diode-pumped quasi-three-level laser: the Yb doped Ca₄GdO(BO₃)₃ (Yb:GdCOB) laser", **IEEE J. Quantum Electron**, Vol. 36 No 5 May, 598-606, 2000
- a[11] J. Queneuille, F. Druon, A. Maksimchuk, G. Chériaux, G. Mourou, K. Nemoto, "Second-harmonic generation and wave-front correction of a Terawatt laser system", **Optics Letters**, Vol. 25 No 7, pp. 508-510, 2000
- a[12] S. Chénais, F. Druon, F. Balembois, G. Lucas-Leclin, P. Georges, A. Brun, M. Zavelani-Rossi, F. Augé, J.P. Chambaret, G. Aka, D. Vivien, "Multimatt, tunable, diode-pumped CW Yb:GdCOB laser", **Applied Physics B** Vol. 72, 389-393 (2001)
- a[13] A. Aron, G. Aka, B. Viana, A. Kahn-Harari, D. Vivien, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, A. Brun, N. Lenain, M. Jacquet "Spectroscopic properties and laser performances of Yb:YCOB and potential of the Yb:LaCOB material", **Optical Materials**, 16, pp. 181-188 (2001).
- a[14] F. Druon, F. Balembois, P. Georges, A. Brun, S.-W. Bahk, J. Nees, G. Mourou, G. Chériaux, J.-P. Chambaret, G. Aka, D. Vivien, "12-mJ, 350-fs, Yb:GdCOB regenerative amplifier", **Optics Communication**, 199, 181-187 (2001)
- a[15] F. Druon, S. Chénais, P. Raybaut, F. Balembois, P. Georges, R. Gaumé, G. Aka, B. Viana, S. Mohr, D. Kopf, "Diode-pumped YbSr₃Y(BO₃)₃ femtosecond laser", **Optics Letters**, Vol. 27, 197-199, (2002)
- a[16] S. Chénais, F. Druon, F. Balembois, and P. Georges, R. Gaumé, P. H. Haumesser, B. Viana, G. P. Aka and D. Vivien, "Spectroscopy and efficient laser action under diode-pumping of a new broadly tunable crystal: Yb^{3+} :Sr₃Y(BO₃)₃", **J. Opt. Soc. Am. B** Vol. 19, No 5, pp. 1083-1091, (2002)
- a[17] F. Druon, S. Chénais, F. Balembois, P. Georges, A. Brun, A. Courjaud, C. Hönninger, F. Salin, M. Zavelani-Rossi, F. Augé, J.P. Chambaret, "High power diode-pumped Yb:GdCOB laser: from continuous-wave to femtosecond regime", **Optical Material** vol.19, no.1 p.73-80, (2002)
- a[18] F. Druon, S. Chénais, P. Raybaut, F. Balembois, P. Georges, R. Gaumé, G. Aka, B. Viana, D. Vivien, J.P. Chambaret, S. Mohr, D. Kopf, "Largely tunable diode-pumped sub-100-fs Yb:BOYS laser", **Applied Physics B**, 74 SUPPL. S201-203 (2002)
- a[19] F. Druon, G.J. Valentine, S. Chénais, P. Raybaut, F. Balembois, P. Georges, A. Brun, A.J. Kemp, W. Sibbett, S. Mohr, D. Kopf, D.J.L. Birkin, D. Burns, A. Courjaud, C. Hönninger, F. Salin, R. Gaumé, A. Aron, G. Aka, B. Viana, C. Clerc, H. Bernas, "Diode-pumped femtosecond oscillator using ultra-broad Yb-doped crystals and modelocked using low-temperature grown or ion implanted saturable-absorber mirrors", **European Physical Journal** 20, 177-182 (2003)
- a[20] F. Druon, S. Chénais, P. Raybaut, F. Balembois, P. Georges, R. Gaumé, P.H. Haumesser, B. Viana, D. Vivien, S. Dhellemmes, V. Ortiz, C. Larat, "A new apatite-structure crystal: Yb^{3+} :SrY₄(SiO₄)₃O, for the development of diode-pumped femtosecond lasers", **Optics Letters** Vol. 27, 1914-16, (2002)
- a[21] S. Chénais, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, A. Brenier, G. Boulon, "Diode-pumped Yb:GGG laser: comparison with Yb:YAG", **Optical Material** vol.22, p.99-106, (2003)
- a[22] S. Chénais, F. Druon, F. Balembois, G. Lucas-Leclin, Y. Fichot, P. Georges, R. Gaumé, B. Viana, G. P. Aka, D. Vivien, "Thermal lensing measurement in diode-pumped Yb-doped GdCOB, YCOB, YSO, YAG and KGW", **Optical Material** vol.22, p.129-137, (2003)
- a[23] F. Druon, N. Sanner, G. Lucas-Leclin, P. Georges, K.P. Hansen, A. Peterson, "self-compression and Raman soliton generation in a photonic crystal fiber of 100-fs pulses produced by a diode-pumped Yb-doped oscillator", **Applied Optics**, Vol. 42 Issue 33 6768-70 (2003)
- a[24] D. N. Papadopoulos, S. Forget, F. Druon, F. Balembois and P. Georges, "Passively mode-locked diode-pumped Nd:YVO₄ oscillator operating at ultra-low repetition rate" **Optics Letters** Vol. 28, 1838-40, (2003)
- a[25] M. Jacquemet, F. Balembois, S. Chénais, F. Druon, P. Georges, R. Gaumé and B. Ferrand "First diode-pumped Yb-doped solid-state laser continuously tunable between 1000 and 1010 nm" **Applied Physics B** Volume 78, Number 1 13-18 (2004)
- a[26] P. Raybaut, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, R. Gaumé, B. Viana, D. Vivien "Directly diode-pumped Yb^{3+} :SrY₄(SiO₄)₃O regenerative amplifier" **Optics Letters** Vol. 28, 2195-97, (2003)
- a[27] F. Druon, F. Balembois and P. Georges, 'Laser crystals for the production of ultra-short laser pulses', **Annales de Chimie Science des Matériaux**, Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS, Vol. 28, Issue 6, Pages 47-72 (2003)
- a[28] S. Chénais, S. Forget, F. Druon, F. Balembois and P. Georges, "Direct and absolute temperature mapping and heat transfer measurements in diode-end-pumped Yb:YAG," **Applied Physics B: Lasers and Optics** Volume 79, 221 - 224 (2004).
- a[29] F. Druon and P. Georges, "Pulse-compression down to 20 fs using a photonic crystal fiber seeded by a diode-pumped Yb:SYS laser at 1070 nm," **Opt. Express** 12, 3383-3396 (2004), <http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=OPEX-12-15-3383>
- a[30] S. Chénais, F. Balembois, F. Druon, G. Lucas-Leclin, P. Georges, "Thermal Lensing in Diode-Pumped Ytterbium Lasers - Part I: Theoretical analysis and wavefront measurements" **IEEE J. Quantum Electronics** Vol. 40 No 9 September, 1217-1234, 2004
- a[31] S. Chénais, F. Balembois, F. Druon, G. Lucas-Leclin, P. Georges, "Thermal Lensing in Diode-Pumped Ytterbium Lasers - Part II: evaluation of quantum efficiencies and thermo-optic coefficients." **IEEE J. Quantum Electronics** Vol. 40 No 9 September, 1235-1243, 2004

- a[32] A.Lucca, M. Jacquemet, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, P. Camy, J.L. Doualan, R. Moncorgé, "High power tunable diode-pumped Yb³⁺:CaF₂ laser," **Optics Letters** Vol. 29 1879-1881 (2004)
- a[33] P. Raybaut, F. Balembois, F. Druon, P. Georges, " Numerical and experimental study of gain narrowing in ytterbium-based regenerative amplifiers " **IEEE J. Quantum Electronics** Vol. 41 No 3 March, 415-425, 2005
- a[34] F. Druon, F. Balembois, and P. Georges, "Ultra-short-pulsed and highly-efficient diode-pumped Yb:SYS mode-locked oscillators," **Opt. Express** **12**, 5005-5012 (2004), <http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=OPEX-12-20-5005>
- a[35] A.Lucca, G. Debourg, M. Jacquemet, F. Druon, F. Balembois, and P. Georges P. Camy, J.L. Doualan, R. Moncorgé, "High-power diode-pumped Yb³⁺:CaF₂ femtosecond laser," **Optics Letters** Vol. 29 2767-2769 (2004)
- a[36] A. Major, J.S. Aitchison, P.W.E. Smith, F. Druon, P. Georges, G. Aka, B. Viana, , "Z-scan measurements of non-linear refractive indices of novel Yb-doped laser crystal host", **Applied Physics B** , 80, 199-201 (2005)
- a[37] M. Jacquemet, C. Jacquemet, N. Janel, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, J. Petit, B. Viana, D. Vivien, and B. Ferrand "Efficient laser action of Yb:LSO and Yb:YSO oxyorthosilicates crystals under high-power diode-pumping," **Applied Physics B** , 80, 171-176 (2005)
- a[38] M. Jacquemet, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, and B. Ferrand, " Blue-green single-frequency laser based on intracavity frequency doubling of a diode-pumped Ytterbium-doped laser," **Opt. Express** **13**, 2345-2350 (2005), <http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=OPEX-13-7-2345>
- a[39] F. Druon, S. Chénais, F. Balembois, P. Georges, R. Gaumé, B. Viana, "Diode-pumped continuous-wave and femtosecond laser operations of a heterocomposite crystal Yb³⁺:SrY₄(SiO₄)₃O||Y₃Al₅O₁₂," **Optics Letters**, Vol. 30, Issue 8, 857-859 (2005)
- a[40] P. Blandin, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, S. Lévêque-Fort, M.P. Fontaine-Aupart, "Diode-pumped passively mode-locked Nd:YVO₄ laser at 914 nm," **Optics Letters** Vol. 31, 214-216 (2006)
- a[41] Y. Zaouter, J. Didierjean, F. Balembois, G. Lucas Leclin, F. Druon, P. Georges, J. Petit, P. Goldner and B. Viana "47-fs diode-pumped Yb³⁺:CaGdAlO₄ laser," **Optics Letters** Vol. 31, 119-121 (2006)
- a[42] M. Hanna, F. Druon, and P. Georges, "Fiber optical parametric chirped-pulse amplification in the femtosecond regime," **Opt. Express** **14**, 2783-2790 (2006)
- a[43] F. Thibault, D. Pelenc, F. Druon, Y. Zaouter, M. Jacquemet, and P. Georges, "Efficient diode-pumped Yb³⁺:Y₂SiO₅ and Yb³⁺:Lu₂SiO₅ high-power femtosecond laser operation," **Optics Letters** **31**, 1555-1557 (2006)
- a[44] Sebastien Forget, Frederic Druon, François Balembois, Patrick Georges, Nicolas Landru, Jean-Philippe Fève, Jiali Lin and Zhiming Weng "Passively Q-switched diode-pumped Cr⁴⁺:YAG/Nd³⁺:GdVO₄ monolithic microchip laser" **Optics Communications**, Volume 259, Issue 2, 15 March 2006, Pages 816-819 (2006)
- a[45] M. Jacquemet, F. Druon, F. Balembois, P. Georges "Single-frequency operation of diode-pumped Yb:KYW at 1003.4 nm and 501.7 nm by intracavity second harmonic generation," **Applied Physics B**, 85, 69-72 (2006)
- a[46] Ch. Gerhard, F. Druon, P. Georges, V. Couderc, "Stable mode-locked operation of a low repetition rate diode-pumped Nd:GdVO₄ laser by combining quadratic polarisation switching and a semiconductor saturable absorber mirror," **Opt. Express** **14**, 7093-7098 (2006), <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=oe-14-16-7093>
- a[47] F. Druon, F. Balembois, P. Georges, "New laser crystals for the generation of ultra-short pulses", Article invité, **Compte Rendu de l'Académie des Sciences**, Advanced Crystal Optics Special Issue cf Boulanger
- a[48] S. Chénais, F. Druon, S. Forget, F. Balembois, P. Georges, "On thermal effects in solid-state lasers: the case of ytterbium-doped materials", invited paper in **Progress in Quantum Electronics** 30 89-153 (2006)
- a[49] J. Mandon, G. Guelachvili, N. Picqué, F. Druon, and P. Georges, "Femtosecond laser Fourier transform absorption spectroscopy," **Opt. Lett.** **32**, 1677-1679 (2007)
- a[50] J. Boudeile, F. Druon, M. Hanna, P. Georges, Y. Zaouter, E. Cormier, J. Petit, P. Goldner, and B. Viana, "Continuous-wave and femtosecond laser operation of Yb:CaGdAlO₄ under high-power diode pumping," **Opt. Lett.** **32**, 1962-1964 (2007)
- a[51] Y. Zaouter, D. N. Papadopoulos, M. Hanna, F. Druon, E. Cormier, and P. Georges, "Third-order spectral phase compensation in parabolic pulse compression," **Opt. Express** **15**, 9372-9377 (2007) <http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?URI=oe-15-15-9372>
- a[52] Christelle Lesvigne, Vincent Couderc, Alessandro Tonello, Philippe Leproux, Alain Barthélémy, Suzanne Lacroix, Frédéric Druon, Pierre Blandin, Marc Hanna, and Patrick Georges "Visible supercontinuum generation controlled by intermodal four-wave mixing in micro-structured fibre" **opt. Lett** (2007)
- a[53] . N. Papadopoulos, Y. Zaouter, M. Hanna, F. Druon, E. Mottay, E. Cormier, and P. Georges, "Generation of 63 fs 4.1 MW peak power pulses from a parabolic fiber amplifier operated beyond the gain bandwidth limit," **Opt. Lett.** **32**, 2520-2522 (2007)
- a[54] Ch. Gerhard, F. Druon, P. Blandin, M. Hanna, F. Balembois, P. Georges, F. Falcoz, " Efficient versatile-repetition-rate picosecond source for material processing applications " **Applied Optics**, sous presse

Chapitres de livre

- b[1] F. Balembois, F. Druon, P. Georges, A. Brun, "Diode-pumped picosecond UV lasers by non-linear frequency conversion", **Ultraviolet Spectroscopy and UV lasers**, Pr. Prabhakar Mistra and Mark A. Dunbiskii, Part 4-3, Édition Marcel Dekker, New York.
- b[2] F. Druon, "sources femtosecondes pompées par diodes" **Lasers et Technologies Femtosecondes**, Publication de l'Université de Saint Etienne 2005,

Brevet

- br[1] **Nanolase**, inventeurs: P. Georges, F. Balembois, F. Druon, A. Brun, P.J. Devilder "Subnanosecond passively Q-switch microchip laser system"

Conférences invitées

- ci[1] S. Chénais, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, A. Brun, F. Mougél, G. Aka, D. Vivien, "High power diode-pumped CW Yb:GdCOB laser", **Invited conference in International Workshop on Optics and Spectroscopy**, SPIE, April 2000, Hanoi, Vietnam
- ci[2] F. Druon, F. Balembois, P. Georges, R. Gaumé, G. Aka, B. Viana, D. Vivien, "Diode pumped femtosecond oscillators based on new ytterbium doped borates crystals ", **Invited conference at Photonics North 2002**, June 2002, Québec, Canada, Application of photonic technology , R. A. Lessard, G. A. Lampropoulos, G. W. Schinn, SPIE vol. 4833 p. 906.
- ci[3] F. Druon, P. Raybaut, F. Balembois, P. Georges, R. Gaumé, G. Aka, B. Viana, D. Vivien, "Development of diode pumped femtosecond lasers based on new ytterbium doped crystals" **Invited conference at 5th French-Israeli Workshop on OPTICAL PROPERTIES of INORGANIC MATERIALS** Lyon (Décembre 2002)
- ci[4] F. Druon, G. Lucas-Leclin, P. Georges, "Effets non-linéaires dans les fibres microstructurées : application à l'autocompression d'impulsions ", **conférence invitée à l'Horizons de l'Optique 2003**, Toulouse 3-5 septembre 2003
- ci[5] F. Druon, P. Raybaut, F. Balembois, P. Georges, R. Gaumé, G. Aka, B. Viana, D. Vivien, "Development of diode pumped femtosecond lasers based on new ytterbium doped crystals" **Conférence Invitée – 12th International Laser Physics Workshop (LPHYS'03)**, Hambourg (25-29 Aout 2003)

- ci[6] F. Druon, P. Raybaut, F. Balembois, P. Georges, A. Brun, R. Gaumé, G. Aka, B. Viana, D. Vivien, "Diode pumped femtosecond lasers based on new ytterbium doped crystals" **Conférence Invitée – Russian-French Laser Symposium RFLS-2003**, Moscou (20-23 Octobre 2003)
- ci[7] P. Georges, F. Druon, P. Raybaut, F. Balembois, R. Gaumé, G. Aka, B. Viana, D. Vivien, "Les nouveaux cristaux dopés à l'ytterbium vont-ils révolutionner la technologie des lasers femtoseconde ?" **Conférence Invitée – JPU 2003** - 6èmes journées des phénomènes ultra-rapides, Mittelwihr (22-24 octobre 2003)
- ci[8] P. Raybaut, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, R. Gaumé, G. Aka, B. Viana, "Directly diode-pumped oscillators and regenerative amplifiers for ultra-short pulse generation", **Conférence Invitée – Conference on Laser and Electro-Optic (CLEO 2004)**, San Fransisco (22-27 May 2004)
- ci[9] B. Viana, J. Petit, R. Gaumé, P. Goldner, D. Vivien, F. Druon, P. Raybaut, F. Balembois, P. Georges, "Yb-doped laser materials for high power ultrafast applications" **Conférence Invitée – Photonics Europe** - Solid State Lasers, Strasbourg (26-30 Avril 2004) Publication des actes dans SPIE Volume 5460
- ci[10] F. Balembois, S. Forget, D. Papadopoulos, F. Druon, P. Georges, "Lasers solides pompés par diode émettant des impulsions picosecondes à haute cadence dans l'ultraviolet" **Conférence Invitée – Colloque UVX 2004**, St Etienne (7-11 Juin 2004)
- ci[11] F. Balembois, M. Jacquemet, A. Lucca, P. Raybaut, F. Druon, P. Georges, G. Aka, B. Viana, Bernard Ferrand, P. Camy, J.L. Doualan, R. Moncorgé, "New Yb-doped solid state laser materials for high power and femtosecond lasers" **Conférence Invitée EPS Europhoton conference – Lausanne** (29 august – 3 sept 2004)
- ci[12] F. Druon and P. Georges, "20 fs pulse compression using a photonic crystal fiber seeded by a diode pumped Yb:SYS laser", **Photonics West 2005**, San José USA (Janvier 2005), Publication des actes dans : Fiber laser II: technology, systems, and applications, edited by L.N. Durvasula, J.W. Brown, Johan Nilsson, Proceedings SPIE Vol. 5709 (SPIE, Bellingham, WA, 2005) 1-12
- ci[13] Y. Zaouter, J. Didierjean, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, J. Petit, B. Viana and P. Goldner, "47 fs in diode-pumped Yb³⁺:CaGdAlO₄" **Conférence Invitée : Photonics Europe**, Strasbourg (Avril 2006), Publication des actes dans : Proceedings of SPIE Vol. 6190 Solid State Lasers and Amplifiers II
- ci[14] F. Druon, J. Boudéile, Y. Zaouter, M. Hanna, F. Balembois, P. Georges, J. Petit, P. Goldner and B. Viana, "New Yb-doped crystals for high power and ultrashort lasers" **Conférence Invitée congrès SPIE Optics for Sececurity and Défense** Stocholm (Septembre 2006)

Conférences avec publications des actes

- ca[1] F. Balembois, F. Druon, F. Falcoz, P. Georges, A. Brun, "Comparison between Cr:LiSAF and Cr:LiSGaF for cw diode-pumped Q-switched operation", **Advanced Solid State Lasers 97**, Topical Meeting, Orlando, February 1997. TOPS OSA Proceedings on Advanced Solid-State Lasers (edited by C.R. POLLOCK and W.R. BOSENBERG, Optical Society of America), **10**, p. 170 (1997).
- ca[2] J. Nees, S. Biswal, F. Druon, J. Faure, M. Nantel, G. Mourou, A. Nishimura, H. Takuma, J. Itatani, J.C. Chanteloup, C. Hönninger, "Ultrahigh intensity laser: Present and future" **AIP conference proceedings** 1998-02-20; 426 (1) : 397-414
- ca[3] F. Druon, F. Balembois, P. Georges, A. Brun, "Compact high-repetition-rate pulsed UV source using diode-pumped microchip laser and multipass amplifier" **Advanced Solid State Lasers 99**, Topical Meeting, February 1999. TOPS OSA Proceedings on Advanced Solid-State Lasers (edited by M.M. Fejer, H. Injeyan, and U. Keller, Optical Society of America), **26**, p. 134 (1999).
- ca[4] F. Druon, F. Augé, F. Balembois, P. Georges, A. Brun, A. Aron, F. Mougél, G. Aka, D. Vivien, "Efficient tunable, zero-line diode-pumped, continuous wave Yb³⁺:CaGdO(BO₃)₃", **Advanced Solid State Lasers 2000**, Feb. 00 Davos, Switzerland.
- ca[5] A. Courjaud, C. Hönninger, F. Salin, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, A. Brun, A. Aron, F. Mougél, G. Aka, D. Vivien, "90-femtosecond diode - pumped Yb:GdCOB laser", **Advanced Solid State Lasers 2000**, Feb. 00 Davos, Switzerland.
- ca[6] S. Chénais, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, A. Brun, F. Mougél, G. Aka, D. Vivien, "High power diode-pumped CW Yb:GdCOB laser", **Invited conference in International Workshop on Optics and Spectroscopy**, SPIE, April 2000, Hanoi, Vietnam
- ca[7] F. Druon, F. Balembois, P. Georges, A. Brun, "Very compact, totally passive, picosecond, 65-kHz, UV at 355 nm and 266 nm laser source", **International Workshop on Optics and Spectroscopy**, SPIE, April 2000, Hanoi, Vietnam
- ca[8] A. Aron, F. Mougél, G. Aka, D. Vivien, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, A. Brun, "Spectroscopic properties and laser performances of Yb : YCOB and potential of the Yb : LaCOB material", **4th French-Israeli Workshop on Optical Properties of Inorganic Materials**, December 1999, Lyon, France.
- ca[9] F. Druon, F. Balembois, P. Georges, A. Brun, G. Aka, D. Vivien, S.W. Bahk, J. Nees, G. Mourou, G. Chériaux, J.P. Chambaret, "12-mJ, 350-fs, Yb:GdCOB regenerative amplifier", **Advanced Solid State Lasers 2001**, January 2001 Seattle, Washington.
- ca[10] F. Druon, S. Chénais, P. Raybaut, F. Balembois, P. Georges, R. Gaumé, G. Aka, B. Viana, D. Vivien, J.P. Chambaret, S. Mohr, D. Kopf, "Large-tunable diode-pumped sub-100-fs Yb:BOYS laser", Post-deadline paper **Ultrafast Optics**, July 2001, Québec, Canada.
- ca[11] F. Druon, S. Chénais, P. Raybaut, F. Balembois, P. Georges, R. Gaumé, G. Aka, B. Viana, D. Vivien, S. Mohr, D. Kopf, "CW and femtosecond regime of a new very broadband Yb-doped BOYS crystal", **Advanced Solid State Lasers 2002**, February 2002, Québec, Canada.
- ca[12] F. Druon, F. Balembois, P. Georges, R. Gaumé, G. Aka, B. Viana, D. Vivien, "Diode pumped femtosecond oscillators based on new ytterbium doped borates crystals", **Invited conference at Photonics North 2002**, June 2002, Québec, Canada, Application of photonic technology, R. A. Lessard, G. A. Lampropoulos, G. W. Schinn, SPIE vol. 4833 p. 906.
- ca[13] F. Druon, P. Raybaut, F. Balembois, P. Georges, R. Gaumé, G. Aka, B. Viana, D. Vivien, "Development of diode pumped femtosecond lasers based on new ytterbium doped crystals" **Invited conference at 5th French-Israeli Workshop on OPTICAL PROPERTIES of INORGANIC MATERIALS** Lyon (Décembre 2002)
- ca[14] F. Druon, N. Sanner, G. Lucas-Leclin, P. Georges, J. Dudley, "Self-compression effects and Raman soliton generation in a photonic crystal fiber seeded by a 100-fs pulsed diode-pumped Yb-doped oscillator", **Advanced Solid State Photonics 2003**, 2-5 February 2003, San Antonio, USA. Publié dans : OSA Trends in Optics and Photonics Vol. 83, *Advanced Solid State Lasers*, John Zayhowski, ed. (Optical Society of America, Washington, DC 2003), pp. 96-99.
- ca[15] P. Raybaut, F. Druon, S. Chénais, F. Balembois, P. Georges, R. Gaumé, B. Viana, D. Vivien, S. Dhellemmes, V. Ortiz, C. Larat, "Diode-pumped 100-fs lasers based on a new apatite-structure crystal : Yb³⁺:SrY₄(SiO₄)₃O", **Advanced Solid State Photonics 2003**, 2-5 February 2003, San Antonio, USA. Publié dans : OSA Trends in Optics and Photonics Vol. 83, *Advanced Solid State Lasers*, John Zayhowski, ed. (Optical Society of America, Washington, DC 2003), pp. 170-174.
- ca[16] M. Jacquemet, F. Balembois, S. Chénais, F. Druon, P. Georges, R. Gaumé, B. Viana and D. Vivien, B. Ferrand, "CW Yb:YSO diode pumped laser emitting at 1003.4 nm for the realization of a stable frequency standard", **Advanced Solid State Photonics 2003**, 2-5 February 2003, San Antonio, USA. Publié dans : OSA Trends in Optics and Photonics Vol. 83, *Advanced Solid State Lasers*, John Zayhowski, ed. (Optical Society of America, Washington, DC 2003), pp. 184-188.
- ca[17] S. Forget, F. Balembois, F. Druon, P. Georges, "Diode-pumped sub-ns ultraviolet laser system operating at 1 MHz", **Advanced Solid State Photonics 2003**, 2-5 February 2003, San Antonio, USA. Publié dans : OSA Trends in Optics and Photonics Vol. 83, *Advanced Solid State Lasers*, John Zayhowski, ed. (Optical Society of America, Washington, DC 2003), pp. 369-372.
- ca[18] M. Jacquemet, A. Lucca, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, P. Camy, J.L. Doualan, R. Moncorgé, "High power CW diode-pumped laser operation of Yb³⁺:CaF₂ crystal" **Photonics Europe**, Solid State Lasers Strasbourg (26-30 Avril 2004), Conf orale, actes SPIE Volume 5460
- ca[19] B. Viana, J. Petit, R. Gaumé, P. Goldner, D. Vivien, F. Druon, P. Raybaut, F. Balembois, P. Georges, "Yb-doped laser materials for high power ultrafast applications" **Conférence Invitée – Photonics Europe** - Solid State Lasers, Strasbourg (Avril 2004) Publication des actes dans SPIE Volume 5460
- ca[20] M. Jacquemet, F. Balembois, F. Druon, P. Georges and B. Ferrand "Single-mode operation at 1003.4 nm with Yb:YSO" **Advanced Solid State Photonics**, Topical Meeting Santa Fé (1-4 February 2004) Conf orale, Publication en cours

- ca[21] S. Forget, S. Chénais, F. Druon, F. Balembois, P. Georges "Heat transfer measurements and high resolution absolute temperature mapping in diode-end-pumped Yb:YAG" **Advanced Solid State Photonics**, Topical Meeting Santa Fé (1-4 February 2004) Publication en cours
- ca[22] F. Druon and P. Georges, "20 fs pulse compression using a photonic crystal fiber seeded by a diode pumped Yb:SYS laser", Conférence invitée **Photonics West 2005**, San José USA (Janvier 2005), Publication des actes dans : Fiber laser II: technology, systems, and applications, edited by L.N. Durvasula, J.W. Brown, Johan Nilsson, Proceedings SPIE Vol. 5709 (SPIE, Bellingham, WA, 2005) 1-12 Publications des actes dans : Proceedings of SPIE -- Volume 5709 Fiber Lasers II: Technology, Systems, and Applications, L. N. Durvasula, Andrew J. W. Brown, Johan Nilsson, Editors, April 2005, pp. 1-12
- ca[23] M. Jacquemet, F. Balembois, F. Druon, P. Georges and B. Ferrand, "Single-frequency operation at 1003.4 nm with Yb:YSO" Conférence Orale : **Photonics West 2005**, San José USA (Janvier 2005) Publications des actes dans : Solid State Lasers XIV: Technology and Devices edited by Hanna J. Hoffman, Ramesh K. Shori, Proceedings SPIE Vol. 5707 (SPIE, Bellingham, WA, 2005) 279-286
- ca[24] Julien Didierjean, Sébastien Forget, Sébastien Chénais, Frédéric Druon, François Balembois, Patrick Georges, Konrad Altmann, Christoph Pflaum "High resolution absolute temperature mapping in laser crystals in diode-end-pumped configuration" Poster, **Photonics West 2005**, San José USA (Janvier 2005) Publications des actes dans : Proceedings of SPIE -- Volume 5707 Solid State Lasers XIV: Technology and Devices, Hanna J. Hoffman, Ramesh K. Shori, Editors, April 2005, pp. 370-379
- ca[25] F. Druon, A. Lucca, F. Balembois, P. Georges, P. Camy, V. Petit, J. L. Doualan, R. Moncorgé, "Diode pumped cw and fs laser based on Yb:CaF₂", **Photonics West 2005**, San José USA (Janvier 2005) Publications des actes dans : Proceedings of SPIE -- Volume 5714 Commercial and Biomedical Applications of Ultrafast Lasers V, Joseph Neev, Christopher B. Schaffer, Andreas Ostendorf, Stefan Nolte, Editors, March 2005, pp. 186-194
- ca[26] F. Druon, F. Balembois, P. Georges, R. Gaumé, B. Viana, "135-fs diode-pumped laser with 1-W average power based on a YAG//Yb:SYS hetero-bonded crystal", **Advanced Solid State Photonics** (ASSP) (février 2005)
- ca[27] A. Lucca, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, P. Camy, V. Petit, J. L. Doualan, R. Moncorgé, "Yb:CaF₂ femtosecond laser", **Advanced Solid State Photonics** (ASSP) (février 2005)
- ca[28] M. Jacquemet, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, J. Petit, B. Viana, P. Goldner, B. Ferrand, "Efficient laser operation with Yb-doped silicates under diode-pumping", **Advanced Solid State Photonics** (ASSP) (février 2005)
- ca[29] S. Forget, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, N. Landru, J.P. Fève, J. Lin, Z. Wenig, "Passively Q-switched diode-pumped Cr⁴⁺:YAG/Nd³⁺:GdVO₄ high repetition rate monolithic microchip laser", **Advanced Solid State Photonics** (ASSP) (février 2005)
- ca[30] P. Blandin, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, S. Lévêque-Fort, M.P. Fontaine-Aupart, "Laser Nd:YVO₄ impulsif à 914 nm pompé par diode", Poster : **COLOQ 9**, Dijon, Septembre 2005
- ca[31] Y. Zaouter, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, J. Petit, P. Goldner, B. Viana, "Génération d'impulsions femtoseconde à partir d'un cristal d'Yb³⁺:CaGdAlO₄" Poster : **COLOQ 9**, Dijon, Septembre 2005
- ca[32] J. Didierjean, F. Balembois, F. Druon, P. Georges, J. Petit, P. Goldner, B. Viana, "Temperature measurements on Nd doped vanadate crystals: Comparative study of Nd:GdVO₄ and Nd:YVO₄, and test of a composite Nd:YVO₄/YVO₄ rod using a new method of bonding.", Poster : **Advanced Solid State Photonics** (ASSP) (Lake Tahoe, février 2006) Publications des actes en cours
- ca[33] J. Petit, P. Goldner, B. Viana, J. Didierjean, F. Balembois, F. Druon, P. Georges, "Quest of athermal solid state laser : case of Yb:CaGdAlO₄", Conférence orale : **Advanced Solid State Photonics** (ASSP) (Lake Tahoe, février 2006) Publications des actes en cours
- ca[34] Y. Zaouter, J. Didierjean, G. Lucas-Leclin, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, J. Petit, P. Goldner and B. Viana, "Diode Pumped Yb:CaGdAlO₄ Femtosecond Laser", Conférence orale : **Advanced Solid State Photonics** (ASSP) (Lake Tahoe, février 2006) Publications des actes en cours
- ca[35] P. Blandin, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, S. Lévêque-Fort, M.P. Fontaine-Aupart, "914 nm diode-pumped passively mode-locked based on Nd:YVO₄", Conférence orale : **Advanced Solid State Photonics** (ASSP) (Lake Tahoe, février 2006) Publications des actes en cours
- ca[36] J. Petit, P. Goldner, B. Viana, J. Didierjean, F. Balembois, F. Druon, P. Georges, "Quest of athermal solid state laser : case of Yb:CaGdAlO₄" Conférence orale : **Photonics Europe**, Strasbourg (Avril 2006) Publication des actes dans : Proceedings of SPIE Vol. 6190 Solid State Lasers and Amplifiers II
- ca[37] J. Didierjean, F. Balembois, F. Druon, P. Georges, J. Petit, P. Goldner, B. Viana, "Temperature measurements on Nd doped vanadate crystals : bulk crystals (Nd:GdVO₄ and Nd:YVO₄) and composite rods" Poster : **Photonics Europe**, Strasbourg (Avril 2006) Publications des actes dans : Proceedings SPIE Vol 6184, Semiconductor Lasers and Laser Dynamics II
- ca[38] Y. Zaouter, J. Didierjean, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, J. Petit, B. Viana and P. Goldner, "47 fs in diode-pumped Yb³⁺:CaGdAlO₄" Conférence invitée : **Photonics Europe**, Strasbourg (Avril 2006), Publication des actes dans : Proceedings of SPIE Vol. 6190 Solid State Lasers and Amplifiers II
- ca[39] F. Druon, J. Boudeille, Y. Zaouter, M. Hanna, F. Balembois, P. Georges, J. Petit, P. Goldner and B. Viana, "New Yb-doped crystals for high power and ultrashort lasers" Conférence invitée congrès **SPIE Optics for Security and Defense** Stockholm (Septembre 2006)
- ca[40] Justine Boudeille, Y. Zaouter, Frédéric Druon, Marc Hanna, Patrick Georges, Johan Petit, Philippe Goldner, Bruno Viana, "Generation of 66-fs 440 mW Average Power Pulses from a Diode Pumped Yb³⁺:CaGdAlO₄ Laser", **Advanced Solid State Photonics** (ASSP), January 28-31, 2007, Vancouver (Canada)
- ca[41] P. Blandin, F. Druon, M. Hanna, S. Lévêque-Fort, C. Lesvigne, V. Couderc, P. Leproux, P. Georges, "Supercontinuum generation in a highly birefringent photonic crystal fibre seeded by a low-repetition rate picosecond infrared laser" SPIE European Symposium on Optics and Optoelectronics, 16 through 19 April 2007 at the Congress Ctr., Prague, Czech Republic. (2007)

Conférences sans publication des actes

- c[1] S. Biswal, F. Druon, J. Nees, G. Mourou, "Ytterbium:glass CPA regenerative amplifier pumped by a free-running Ti:Sapphire laser", **CLEO 97** (Conference on Lasers and Electro-Optics), Baltimore, US, Technical digest, vol. 11, p-319, May 1997
- c[2] F. Balembois, F. Druon, F. Falcoz, P. Georges, A. Brun, "Use of Cr:LiSGaF and Cr:LiSAF for cw diode-pumped Q-switched operation", **CLEO 97**, Baltimore, US, p-405, May 1997
- c[3] J.C. Chanteloup, F. Druon, M. Nantel, A. Maksimchuk, G. Mourou, "Single shot wave front measurement using a three wave interferometer", **Post deadline paper** at **CLEO 97**, Baltimore, US, CPD9, May 1997.
- c[4] S. Biswal, F. Druon, A. Nishimura, J. Nees, G. Mourou, "Chirped pulsed amplification in a ytterbium: glass regenerative amplifier", **CLEO 97 Pacific Rim**, The Institute of Electrical and Electronics Engineering, Inc., Piscataway, NJ), p. 15, 1997.
- c[5] F. Druon, G. Chériaux, G. Vdovin, J. Nees, G. Mourou, "Single-shot B-integral wave-front correction of femtosecond laser pulses", **CLEO 98**, San-Francisco, US, Technical digest, vol. 6, p-279, May 1998
- c[6] F. Druon, G. Chériaux, A. Maksimchuk, G. Mourou, "Wave-front correction of femtosecond Terawatt lasers using deformable mirrors", **CLEO Europe 98**, Technical digest, p-6, September 1998
- c[7] G. Chériaux, F. Druon, A. Maksimchuk, M. Nantel, G. Mourou, "Wavefront correction of high intensity femtosecond lasers", **Ultrafast Phenomena 98**, 1998.

- c[8] F. Druon, F. Balembois, P. Georges, A. Brun, "Efficient totally-passive compact high-repetition-rate picosecond UV source", **CLEO 99**, Baltimore, US, Technical digest, p-87, May 1999
- c[9] J. Queneuille, A. Maksimchuk, F. Druon, G. Chériaux, G. Mourou, "Single shot wavefront measurements and correction of femtosecond Terawatt lasers", **CLEO 99**, Baltimore, US, Technical digest, p-72, May 1999
- c[10] F. Druon, F. Balembois, P. Georges, A. Brun, "New generation of very-high-repetition rate subnanosecond pulsed UV sources", 18th Congress of the International Commission for Optics, **ICO XVIII**, San Francisco, August 1999.
- c[11] F. Druon, F. Balembois, P. Georges, A. Brun, "Very efficient totally-passive compact high-repetition-rate picosecond UV source", **Physique en Herbe**, Oléron, June 99.
- c[12] F. Druon, G. Valentine, F. Augé, F. Balembois, P. Georges, A. Brun, A. Aron, F. Mougél, G. Aka, D. Vivien, "77%-slope-efficiency, 800-mW-average-power, diode-pumped at 976 nm $\text{Yb}^{3+}:\text{Ca}_2\text{GdO}(\text{BO}_3)_3$ laser", **CLEO 2000**, San-Francisco, US, Technical digest, p. 119, May 2000
- c[13] C. Hönninger, A. Courjaud, F. Salin, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, A. Brun, A. Aron, F. Mougél, G. Aka, D. Vivien, "90-fs pulses from a diode-pumped $\text{Yb}:\text{GdCOB}$ laser", **CLEO 2000**, San-Francisco, US, Technical digest, p. 225, May 2000
- c[14] F. Druon, F. Balembois, P. Georges, A. Brun, C. Hönninger, A. Courjaud, F. Salin, A. Aron, F. Mougél, G. Aka, D. Vivien, "Yb:GdCOB, a new crystal for sub-100-fs diode-pumped lasers", **CLEO Europe 2000**, Nice, France, Sept. 2000
- c[15] S. Chénais, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, A. Brun, M. Zavelani-Rossi, F. Augé, J.P. Chambaret, F. Mougél, G. Aka, D. Vivien, "3-W, diode-pumped, tunable, CW Yb:GdCOB laser", **CLEO Europe 2000**, Nice, France, Sept. 2000
- c[16] S.W. Bahk, J. Nees, G. Mourou, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, A. Brun, G. Aka, D. Vivien, G. Chériaux, J.P. Chambaret, "Yb:GdCOB regenerative amplifier", **CLEO 2001**, Baltimore, US, May 2001
- c[17] S. Chénais, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, A. Brun, R. Gaumé, P.H. Haumesser, G. Aka, D. Vivien, "Diode-pumped laser action in a new broadly tunable crystal: $\text{Yb}^{3+}:\text{Sr}_2\text{Y}(\text{BO}_3)_3$ ", **CLEO 2001**, Baltimore, US, May 2001
- c[18] S. Chénais, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, A. Brun, A. Brenier, G. Boulon, "Diode-pumped operation of $\text{Yb}:\text{GGG}$ laser", **CLEO 2001**, Baltimore, US, May 2001
- c[19] F. Druon, S. Chénais, P. Raybaut, F. Balembois, P. Georges, R. Gaumé, A. Aron, G. Aka, B. Viana, D. Vivien, A. Courjaud, C. Hönninger, F. Salin, "Oscillateurs laser femtosecondes à base de cristaux de borates inédits dopés aux ions ytterbium", **COLOQ 2001**, Rennes France, 5-7 sept 2001
- c[20] F. Druon, P. Raybaut, S. Chénais, F. Balembois, P. Georges, S. Mohr, D. Kopf, R. Gaumé, G. Aka, B. Viana, D. Vivien, "69-fs and broadly-tunable diode-pumped Yb:BOYS laser", **CLEO 2002**, Long Beach CA, US, May 2002
- c[21] S. Chénais, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, A. R. Gaumé, B. Viana, G. P. Aka, D. Vivien, "Evidence of nonradiative processes in Yb-doped oxoborate crystals by thermal lensing measurements", **CLEO 2002**, Long Beach CA, US, May 2002
- c[22] F. Druon, N. Sanner, G. Lucas-Leclin, P. Georges, R. Gaumé, B. Viana, K. P. Hansen, A. Petersson, "Self-compression of 1- μm femtosecond pulses in a photonic crystal fiber", **Post deadline paper at CLEO 2002**, Long Beach CA, US, May 2002
- c[23] V. Ortiz, F. Druon, A. Alexandrou, "GaAs épitaxié à basse température: modélisation de la photoréflexivité résolue en temps", Journées Nationales Mircoélectronique et Optoélectronique **JNMN 2002**, St Aygulf, septembre 2002
- c[24] F. Druon, G. Lucas-Leclin, N. Sanner, P. Georges, "Auto-compression d'impulsions femtosecondes à 1 μm dans une fibre à cristaux photoniques", Journées Nationales de l'Optique Guidée **JNOG 2002**, Dijon, septembre 2002
- c[25] P. Raybaut, F. Druon, S. Chénais, F. Balembois, P. Georges, S. Dhellemmes, V. Ortiz, C. Larat, R. Gaumé, B. Viana, D. Vivien, "Directly diode-pumped $\text{Yb}^{3+}:\text{SrY}_4(\text{SiO}_4)_3\text{O}$ 100-fs lasers", **CLEO 2003**, Baltimore, US, 1-6 June 2003
- c[26] S. Forget, G. Lucas-Leclin, F. Balembois, F. Druon, P. Georges, "Compact sub-ns tunable laser system operating at 1 MHz", **CLEO 2003**, Baltimore, US, 1-6 June 2003
- c[27] M. Jacquemet, P. Raybaut, F. Balembois, S. Chénais, F. Druon, P. Georges, R. Gaumé, B. Viana, D. Vivien, B. Ferrand, "CW diode pumped Yb:YSO laser for the development of a stable standard of optical frequencies", **CLEO 2003**, Baltimore, US, 1-6 June 2003
- c[28] S. Chénais, F. Balembois, F. Druon, P. Georges, R. Gaumé, B. Viana, G. P. Aka, D. Vivien, "Multiwatt and broadly tunable laser action from diode-pumping of two silicate ytterbium-doped crystals: $\text{Yb}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ and $\text{Yb}:\text{SrY}_4(\text{SiO}_4)_3\text{O}$ ", **CLEO-Europe 2003**, Munich, Germany, 22-27 June 2003
- c[29] S. Forget, F. Balembois, F. Druon, G. Lucas-Leclin, P. Georges, "Diode-pumped sub-ns ultraviolet laser system operating at 1 Hz", **CLEO-Europe 2003**, Munich, Germany, 22-27 June 2003
- c[30] P. Raybaut, F. Druon, S. Chénais, F. Balembois, P. Georges, S. Dhellemmes, V. Ortiz, C. Larat, R. Gaumé, B. Viana, D. Vivien, "Diode-pumped 100-fs lasers based on a new apatite-structure crystal: $\text{Yb}^{3+}:\text{SrY}_4(\text{SiO}_4)_3\text{O}$ ", **CLEO-Europe 2003**, Munich, Germany, 22-27 June 2003
- c[31] S. Chénais, F. Balembois, F. Druon, G. Lucas-Leclin, P. Georges, "Quantum efficiency measurements in Yb-doped crystals using an optical method", **CLEO-Europe 2003**, Munich, Germany, 22-27 June 2003
- c[32] F. Druon, P. Georges, "Stability of soliton regimes near bifurcation in passively modelocked high gain Yb-doped femtosecond lasers", **CLEO-Europe 2003**, Munich, Germany, June 2003
- c[33] M. Jacquemet, F. Balembois, S. Chénais, F. Druon, P. Georges, R. Gaumé, B. Viana, D. Vivien, B. Ferrand, "CW Yb:YSO diode pumped laser emitting at 1003.4 nm for the development of a stable frequency standard", **CLEO-Europe 2003**, Munich, Germany, 22-27 June 2003
- c[34] V. Ortiz, J. Nagle, S. Dhellemmes, Ch. Larat, F. Druon P. Georges, A. Alexandrou, "Study of low-temperature-grown (In)GaAs: application to the realization of Semiconductor Saturable Absorber Mirrors", **CLEO-Europe 2003**, Munich, Germany, 22-27 June 2003
- c[35] F. Druon, G. Lucas-Leclin, P. Georges, "Effets non-linéaires dans les fibres microstructurées : application à l'autocompression d'impulsions", **conférence invitée à l'Horizons de l'Optique 2003**, Toulouse septembre 2003
- c[36] G. Lucas-Leclin, F. Druon, P. Georges, "Sources d'impulsions solitoniques auto-compressées et accordables en longueur d'onde de 1 μm à 1,5 μm ", **JPU 2003** - 6^{èmes} journées des phénomènes ultra-rapides, Mittelwihl (22-24 octobre 2003)
- c[37] F. Druon, P. Georges, "Génération d'impulsions de 23 fs à 1 μm à partir d'un oscillateur pompé par diode et d'une fibre microstructurée à dispersion nulle", **JPU 2003** - 6^{èmes} journées des phénomènes ultra-rapides, Mittelwihl (22-24 octobre 2003)
- c[38] S. Forget, S. Chénais, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, "Méthodes de caractérisation des effets thermiques dans les cristaux lasers : lentille thermique et température absolue", Journées Nationales des Cristaux pour l'Optique, **JNCO 2003**, Lyon-Ecully (69) (5-7 Novembre 2003)
- c[39] M. Jacquemet, F. Balembois, F. Druon, P. Georges, R. Gaumé, B. Viana, D. Vivien, B. Ferrand, "Laser Yb:YSO, pompé par diode, continu et accordable dans la plage 1000-1010 nm, pour la définition d'un étalon secondaire de fréquences", Journées Nationales des Cristaux pour l'Optique, **JNCO 2003**, Lyon-Ecully (69) (5-7 Novembre 2003)
- c[40] F. Druon, P. Raybaut, F. Balembois, P. Georges, R. Gaumé, G. Aka, B. Viana, D. Vivien, "Development of diode pumped femtosecond lasers based on new ytterbium doped crystals", **Conférence Invitée** - 12th International Laser Physics Workshop (**LPHYS'03**), Hambourg (Aout 2003)
- c[41] F. Druon, G. Lucas-Leclin, P. Georges, "Effets non-linéaires dans les fibres microstructurées : application à l'autocompression d'impulsions", **Conférence Invitée** - **COLOQ 8**, Septembre 2003, Toulouse, France
- c[42] F. Druon, P. Raybaut, F. Balembois, P. Georges, A. Brun, R. Gaumé, G. Aka, B. Viana, D. Vivien, "Diode pumped femtosecond lasers based on new ytterbium doped crystals", **Conférence Invitée** - Russian-French Laser Symposium **RFLS-2003**, Moscou (Octobre 2003)
- c[43] P. Georges, F. Druon, P. Raybaut, F. Balembois, R. Gaumé, G. Aka, B. Viana, D. Vivien, "Les nouveaux cristaux dopés à l'ytterbium vont-ils révolutionner la technologie des lasers femtoseconde ?", **Conférence Invitée** - **JPU 2003** - 6^{èmes} journées des phénomènes ultra-rapides, Mittelwihl (22-24 octobre 2003)
- c[44] P. Raybaut, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, R. Gaumé, G. Aka, B. Viana, "Directly diode-pumped oscillators and regenerative amplifiers for ultra-short pulse generation", **Conférence Invitée** - Conference on Laser and Electro-Optic (**CLEO 2004**), San Francisco (May 2004)
- c[45] F. Balembois, S. Forget, D. Papadopoulos, F. Druon, P. Georges, "Lasers solides pompés par diode émettant des impulsions picosecondes à haute cadence dans l'ultraviolet", **Conférence Invitée** - **Colloque UVX 2004**, St Etienne (Juin 2004)

- c[46] F. Balembois, M. Jacquemet, A. Lucca, P. Raybaut, F. Druon, P. Georges, G. Aka, B. Viana, Bernard Ferrand, P. Camy, J.L. Doualan, R. Moncorgé, "New Yb-doped solid state laser materials for high power and femtosecond lasers" **Conférence Invitée EPS Europhoton conference – Lausanne** (29 august – 3 sept 2004)
- c[47] M. Jacquemet, F. Balembois, F. Druon, P. Georges, B. Ferrand, "Yb:YSO diode-pumped single-mode laser at 1003.4 nm", Conference on Laser and Electro-Optic (**CLEO 04**), San Francisco (22-27 May 2004)
- c[48] S. Forget, S. Chénais, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, "High resolution absolute temperature mapping in diode-end-pumped Yb:YAG and heat transfer measurements" Conference on Laser and Electro-Optic (CLEO), San Francisco (22-27 May 2004)
- c[49] A. Major, J. S. Aitchison and P. W. E. Smith, F. Druon, P. Georges, B. Viana, G. P. Aka "Z-scan measurements of the nonlinear refractive indices of novel Yb-doped laser crystal hosts" Conference on Laser and Electro-Optic (**CLEO 04**), San Francisco (22-27 May 2004)
- c[50] F. Druon, P. Georges "Pulse compression in a photonic-crystal-fiber of a diode-pumped Yb:SYS oscillator and production of 23-fs pulses" Conference on Laser and Electro-Optic (**CLEO 04**), San Francisco (22-27 May 2004)
- c[51] A. Lucca, F. Druon, M. Jacquemet, F. Balembois, P. Georges, P. Camy, J.L. Doualan, R. Moncorgé "First demonstration of diode-pumped cw and femtosecond Yb³⁺:CaF₂ lasers" **Post-deadline** Conference on Laser and Electro-Optic (22-27 **CLEO 04**), San Francisco (May 2004)
- c[52] F. Druon, S. Chénais, F. Balembois, P. Georges, R. Gaumé, B. Viana, "New hetero-bonding crystal YAG||SYS:Yb, from the cw to the fs diode-pumped laser operation", **Conference on Laser and Electro-Optic** (CLEO), Baltimore (May 2005)
- c[53] F. Thibault, D. Pelenc, F. Druon, M. Jacquemet, F. Balembois, P. Georges, "Very efficient diode-pumped Yb³⁺:Y₂SiO₅ and Yb³⁺:Lu₂SiO₅ femtosecond laser", **Conference on Laser and Electro-Optic** (CLEO), Baltimore (May 2005)
- c[54] F. Thibault, D. Pelenc, F. Druon, M. Jacquemet, F. Balembois, P. Georges, "High power diode pumped femtosecond laser based on Ytterbium doped YSO and LSO crystals", **CLEO Europe**, Munich (June 2005)
- c[55] Y. Zaouter, F. Balembois, F. Druon, P. Georges, J. Petit, P. Goldner and, B. Viana "Génération d'impulsions femtoseconde à partir d'un cristal d'Yb³⁺:CaGdAlO₄", Poster : **Horizons de l'Optique**, Chambéry, Novembre 2005
- c[56] V. Petit, P. Camy, J. L. Doualan, R. Moncorgé, A. Lucca, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, "CaF₂:Yb³⁺, étude spectroscopique et fonctionnement laser accordable et à impulsions courtes", **Conférence orale: Journées Nationales des Cristaux pour l'Optique** (JNCO) Valpré-Ecully (12-14 déc. 2005)
- c[57] J. Petit, P. Goldner, B. Viana, Y. Zaouter, J. Didierjean, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, "CaGdAlO₄:Yb³⁺, matériau laser pour la puissance et la génération d'impulsions courtes", **Conférence orale: Journées Nationales des Cristaux pour l'Optique** (JNCO) Valpré-Ecully (12-14 déc. 2005)
- c[58] F. Thibault, D. Pelenc, M. Couchaud, B. Chambaz, B. Ferrand, F. Druon, Y. Zaouter, M. Jacquemet, P. Georges, "Laser de forte puissance et production d'impulsions femtosecondes dans des cristaux d'YSO et LSO dopés ytterbium. Croissance de couches minces pour application laser", **Conférence orale: Journées Nationales des Cristaux pour l'Optique** (JNCO) Valpré-Ecully (12-14 déc. 2005)
- c[59] P. Blandin, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, S. Lévêque-Fort, M.P. Fontaine-Aupart, "Impulsions picoseconde à 914 nm à partir d'un laser Nd:YVO₄ pompé par diode", Poster: **Journées Nationales des Cristaux pour l'Optique** (JNCO) Valpré-Ecully (12-14 déc. 2005)
- c[60] J. Didierjean, F. Balembois, F. Druon, P. Georges, J. Petit, P. Goldner, B. Viana, "Temperature measurements on Nd doped vanadate crystals: bulk crystals (Nd:GdVO₄ and Nd:YVO₄) and composite rods using a new method of bonding." Poster: **Journées Nationales des Cristaux pour l'Optique** (JNCO) Valpré-Ecully (12-14 déc. 2005)
- c[61] F. Druon, P. Georges, S. Lebrun, P. Delaye, "Non-linear effects in microstructured optical fibers", **Indo-French young scientists meeting on Laser Physics and Quantum Optics** organized by the Indo-French Centre for the Promotion of Advanced Research (IFCPAR-CEFIPRA), Bangalore, India, january 4-8, 2006
- c[62] P. Blandin, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, S. Lévêque-Fort, M.P. Fontaine-Aupart, "First picosecond Nd:YVO₄ diode pumped solid state laser at 914 nm" Oral : **Conference on Laser and Electro-Optic** (CLEO), Long Beach (May 2006)
- c[63] J. Boudeïle, Y. Zaouter, M. Hanna, F. Balembois, F. Druon, P. Georges, J. Petit, P. Goldner, B. Viana, "Yb³⁺:CaGdAlO₄ crystal for 47-fs-pulsed diode-pumped laser", Oral : **Conference on Laser and Electro-Optic** (CLEO), Long Beach (May 2006)
- c[64] J. Boudeïle, F. Druon, M. Hanna, P. Georges, J. Petit, P. Goldner, B. Viana, "530 mW average power 76-fs diode pumped Yb³⁺:CaGdAlO₄ laser", **Conférence orale: Europhotons** (Pise) (10-15 sept 2006)
- c[65] J. J. Boudeïle, F. Druon, M. Hanna, P. Georges, J. Petit, P. Goldner, B. Viana, "530 mW average power 76-fs diode pumped Yb³⁺:CaGdAlO₄ laser", Poster : **EOS Meeting**, Paris (Octobre 2006)
- c[66] Ch. Gerhard, F. Druon, P. Georges, "Dual-mode-locking technique: quadratic polarisation switching and a semiconductor saturable absorber mirror for ultra-stable mode-locked operation at low repetition rate of a diode-pumped Nd:GdVO₄ laser" **Conf orale: EOS Meeting**, Paris (Octobre 2006)
- c[67] M. Hanna, F. Druon, P. Georges, "Optical Parametric Chirped-Pulse Amplification in Fibers", Poster : **EOS Meeting**, Paris (Octobre 2006)
- c[68] P. Blandin, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, S. Lévêque-Fort, M.P. Fontaine-Aupart, "Instrumental development for Fluorescence Lifetime Imaging Microscopy (FLIM)", Poster : **Ecole d'été Nanobio** Cargèse (17-29 juillet 2006)
- c[69] P. Blandin, F. P. J. Druon, M. Hanna, P. Georges, P. Leproux, V. Couderc, M. Fontaine-Aupart, P. M. Georges, "Supercontinuum generation in a highly birefringent photonic crystal fiber seeded by a low-repetition rate picosecond infrared laser" **SPIE European Symposium on Optics and Optoelectronics**, 16-19 April 2007, Prague, Czech Republic
- c[70] P. Blandin, S. Leveque-Fort, F. Druon, M. Hanna, P. Georges, R. Briandet, Z. Lenkei, M.P. Fontaine-Aupart, "Fluorescence lifetime imaging in TIRF microscopy" **Focus On Microscopy Conference** (April 10-13, Valencia, Spain) 2007
- c[71] J. -P. Chambaret, F. Canova, R. Lopez-Martens, G. Chériaux, G. Mourou, A. Cotel, C. Le Blanc, F. Druon, P. Georges, N. Forget, F. Plé, and M. Pittman, "ILE 25PW Single Laser Beamline: The French Step for the European Extreme Light Infrastructure (ELI)," in **Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications Systems Technologies**, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2007), paper JWC4.
- c[72] P. Blandin, S. Lévêque-Fort, F. Druon, M. Hanna, P. Georges, R. Briandet, Z. Lenkei and M.P. Fontaine-Aupart "Development of a TIRF-FLIM microscope for biomedical applications." **European Conference on Biomedical Optics**, 17-21 June 2007 Munich, Germany.
- c[73] P. Blandin, F. Druon, M. Hanna, S. Lévêque-Fort, M.P. Fontaine-Aupart, C. Lesvigne, V. Couderc, P. Leproux, P. Georges "Supercontinuum generation in a highly birefringent photonic crystal fiber seeded by a low-repetition rate picosecond infrared laser" **LEO/Europe 2007**, 17-22 June 2007 Munich, Germany.
- c[74] J. Boudeïle, F. Druon, M. Hanna, P. Georges, Y. Zaouter, J. Petit, P. Goldner and B. Viana "68-fs passively mode-locked diode-pumped Yb³⁺:CaGdAlO₄ laser with an average power of 520 mW" **CLEO/Europe 2007**, 17-22 June 2007 Munich, Germany.
- c[75] Y. Zaouter, M. Hanna, F. Druon, E. Cormier, P. Georges "Third-order spectral phase compensation in parabolic pulse compression" **CLEO/Europe 2007**, 17-22 June 2007 Munich, Germany.
- c[76] D. Papalopoulos, Y. Zaouter, M. Hanna, F. Druon, E. Cormier, P. Georges "Generation of 63-fs 4.6-MW pulses from a fiber parabolic amplifier" **CLEO/Europe 2007 Post-deadline**, 17-22 June 2007 Munich, Germany.

Diffusion de l'information scientifique

- d[1] Opto&Laser Europe, p 15, Juillet 2000. "Ytterbium-doped crystals "ideal" for ultrafast generation".
- d[2] Opto&Laser Europe, p 14, Février 2002. "Ytterbium source extends the ultrashort-pulse regime".

Séminaires

s[1] Frédéric DRUON

“Des nouveaux systèmes lasers femtoseconde à base de cristaux dopés à l'ytterbium“

Laboratoire de Physique des Lasers, Institut Galilée, Université Paris 13, Villetaneuse, 18 Février 2005

s[2] Frédéric DRUON

“Lasers impulsions pour la microscopie“

Ecole thématique interdisciplinaire Microscopie Fonctionnelle en Biologie (MIFOBIO), 21-26 septembre 2006

s[3] Frédéric Druon, Jean-Paul Chambaret,

Intervention à la Journée diagnostique organisée par la **Coopération des Lasers Intenses du Plateau de Saclay (CLIPS)** :

«Les diagnostics spatiaux » (2005)

s[4] F.Druon, M.Jacquemet, A.Lucca, P.Raybaut, F.Balembois, P.Georges, G. Aka, B. Viana, B. Ferrand, P. Camy, J.L. Doualan, R. Moncorgé

Intervention à l'Atelier Pompage par diode organisée par la **Coopération des Lasers Intenses du Plateau de Saclay (CLIPS)** :

New Yb-doped solid-state laser materials for high power and femtosecond lasers (2005)

Copies d'articles

1. Sources femtoseconde

- a[26] P. Raybaut, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, R. Gaumé, B. Viana, D. Vivien "Directly diode-pumped $\text{Yb}^{3+}:\text{SrY}_4(\text{SiO}_4)_3\text{O}$ regenerative amplifier" **Optics Letters** Vol. 28, 2195-97, (2003)
- a[35] A.Lucca, G. Debourg, M. Jacquemet, F. Druon, F. Balembois, and P. Georges P. Camy, J.L. Doualan, R. Moncorgé, "High-power diode-pumped $\text{Yb}^{3+}:\text{CaF}_2$ femtosecond laser," **Optics Letters** Vol. 29 2767-2769 (2004)
- a[41] Y. Zaouter, J. Didierjean, F. Balembois, G. Lucas Leclin, F. Druon, P. Georges, J. Petit, P. Goldner and B. Viana "47-fs diode-pumped $\text{Yb}^{3+}:\text{CaGdAlO}_4$ laser," **Optics Letters** Vol. 31, 119-121 (2006)

2. Effets non-linéaires et amplification dans les fibres

- a[29] F. Druon and P. Georges, "Pulse-compression down to 20 fs using a photonic crystal fiber seeded by a diode-pumped $\text{Yb}:\text{SYS}$ laser at 1070 nm," **Opt. Express** **12**, 3383-3396 (2004), <http://www.opticsexpress.org/abstract.cfm?URI=OPEX-12-15-3383>
- a[53] . N. Papadopoulos, Y. Zaouter, M. Hanna, F. Druon, E. Mottay, E. Cormier, and P. Georges, "Generation of 63 fs 4.1 MW peak power pulses from a parabolic fiber amplifier operated beyond the gain bandwidth limit," **Opt. Lett.** **32**, 2520-2522 (2007)

3. Sources picoseconde

- a[40] P. Blandin, F. Druon, F. Balembois, P. Georges, S. Lévêque-Fort, M.P. Fontaine-Aupart, "Diode-pumped passively mode-locked $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ laser at 914 nm," **Optics Letters** Vol. 31, 214-216 (2006)
- a[46] Ch. Gerhard, F. Druon, P. Georges, V. Couderc, "Stable mode-locked operation of a low repetition rate diode-pumped $\text{Nd}:\text{GdVO}_4$ laser by combining quadratic polarisation switching and a semiconductor saturable absorber mirror," **Opt. Express** **14**, 7093-7098 (2006),

4. Applications

- a[49] J. Mandon, G. Guelachvili, N. Picqué, F. Druon, and P. Georges, "Femtosecond laser Fourier transform absorption spectroscopy," **Opt. Lett.** **32**, 1677-1679 (2007)
- a[53] Ch. Gerhard, F. Druon, P. Blandin, M. Hanna, F. Balembois, P. Georges, F. Falcoz, " Efficient versatile-repetition-rate picosecond source for material processing applications " *Applied Optics*, sous presse