

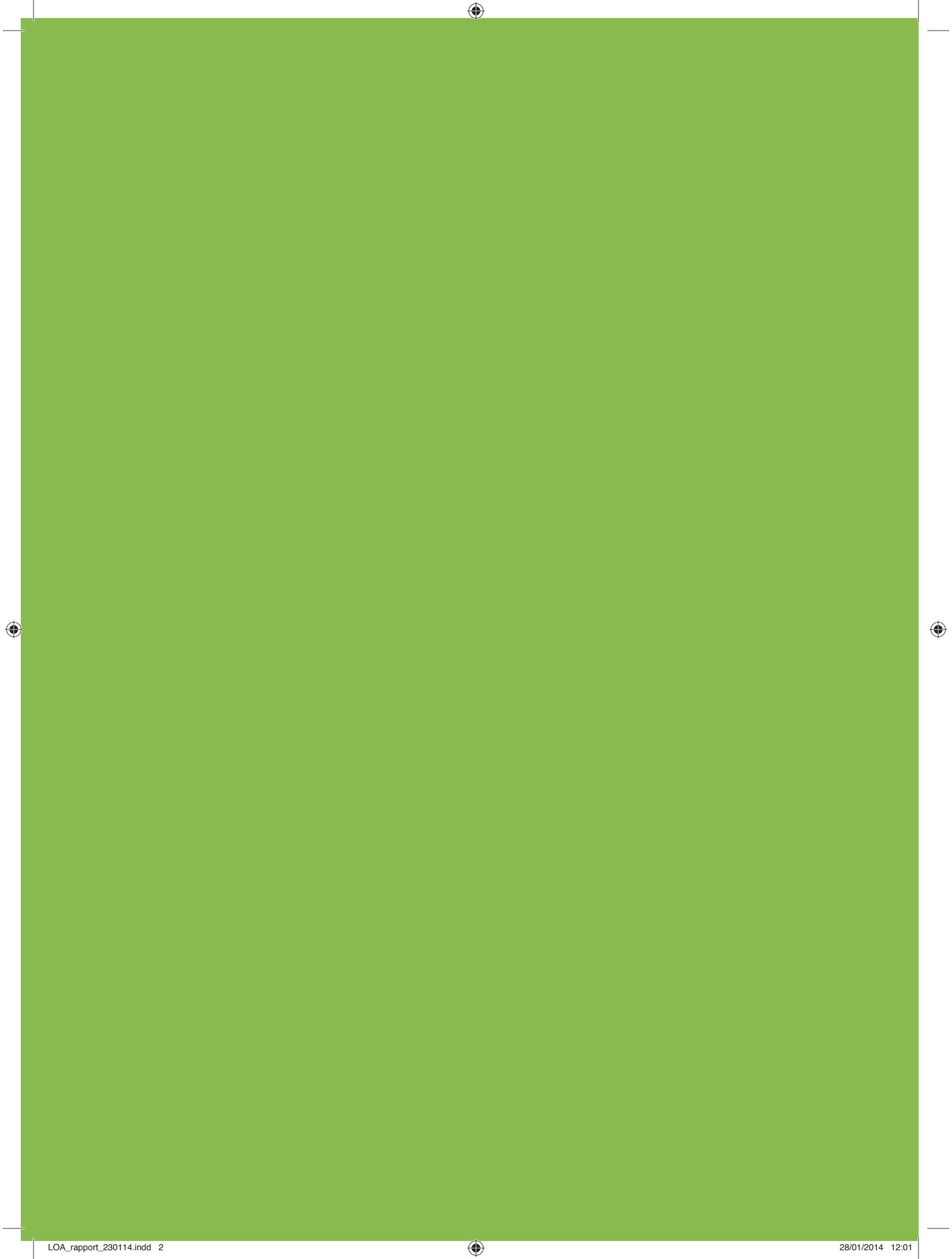


laboratoire d'optique appliquée

RAPPORT D'ACTIVITE

LOA 2008-2013

ENSTA-ParisTech, Ecole Polytechnique,
CNRS UMR7639



Sommaire

HISTORIQUE DU LOA **05**

ORGANISATION ET INFRASTRUCTURES **09**

FAITS MARQUANTS **14**

RÉSULTATS SCIENTIFIQUES MAJEURS **16**

AVANCÉES SCIENTIFIQUES DES EQUIPES

ILM **19**

SPL **27**

FCB **35**

LHP **39**

FLEX **43**

PCO **53**

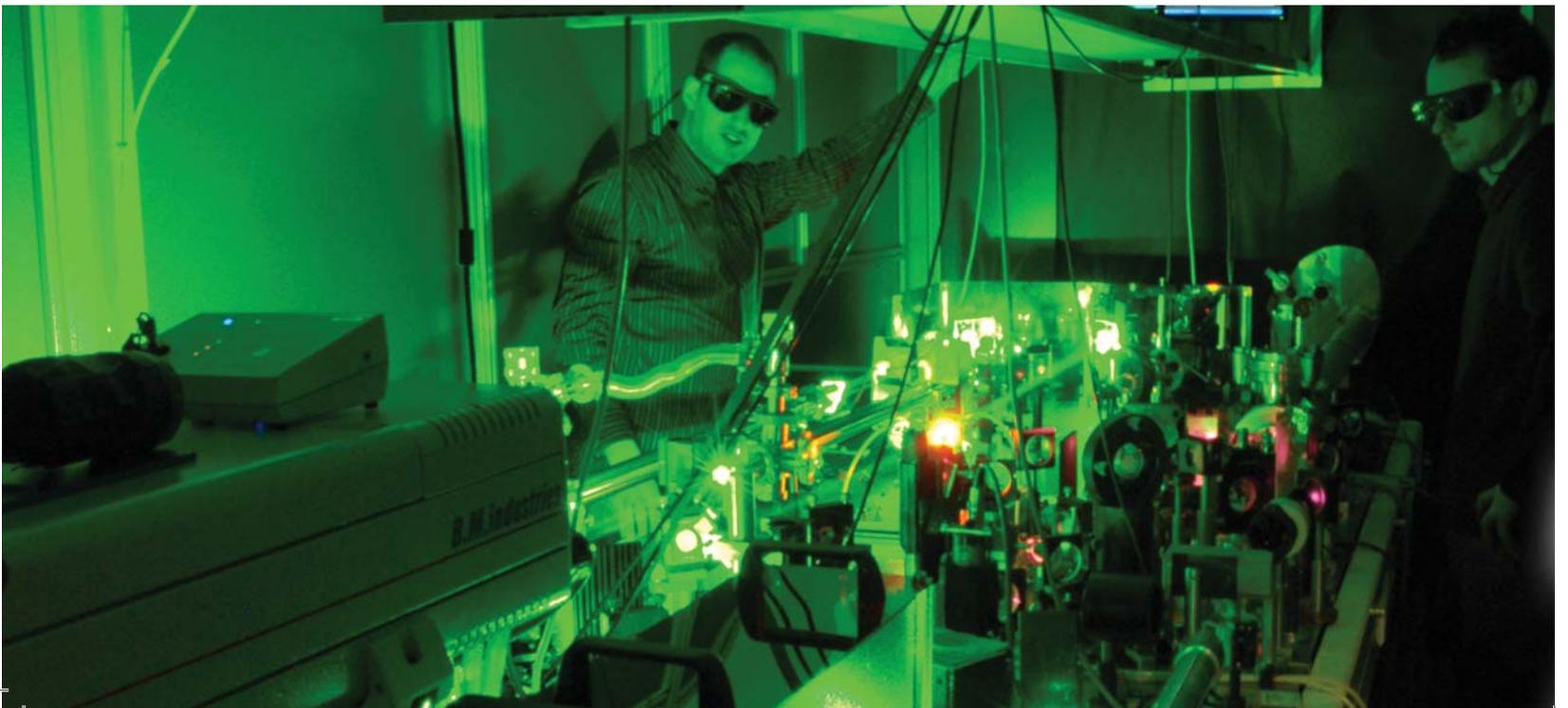
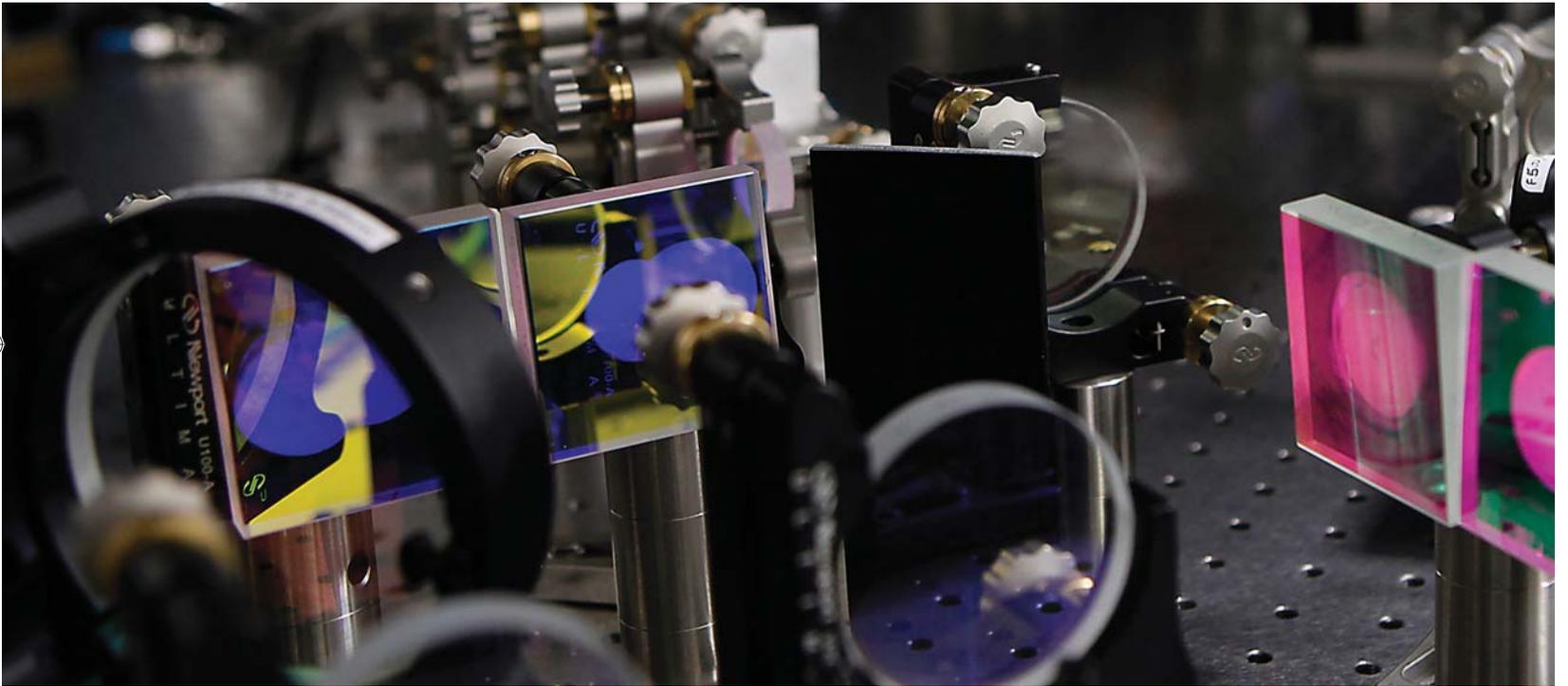
OPS **61**

APPLI **67**

RESSOURCES HUMAINES ET FORMATION **72**

RESSOURCES FINANCIERES **77**

CHIFFRES CLES **80**



Historique du LOA

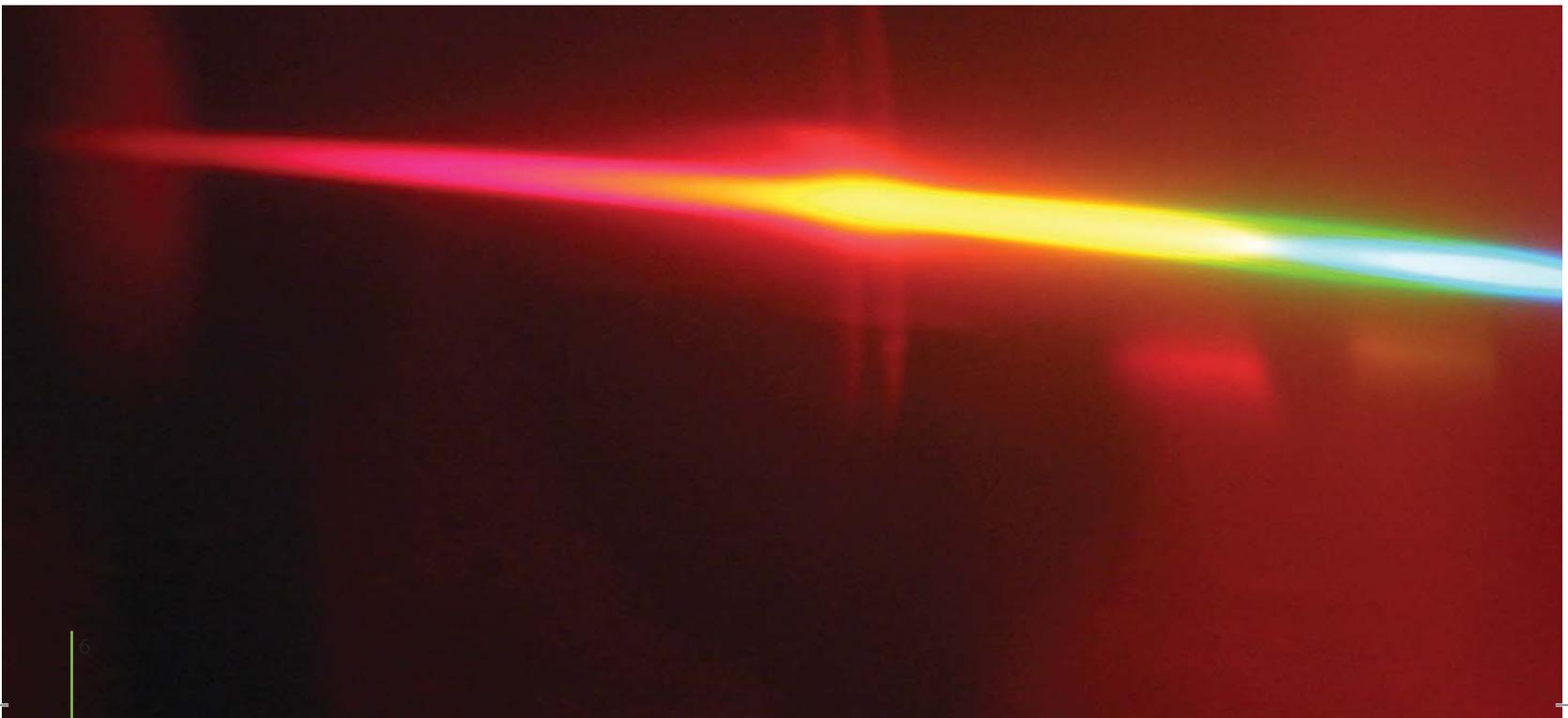
Le Laboratoire d'Optique Appliquée (LOA), unité mixte de recherche (UMR) CNRS / Ecole Polytechnique (EP) / ENSTA-Paristech (UMR 7639), est hébergé au centre de l'Yvette de l'ENSTA-ParisTech à Palaiseau. Le laboratoire a été créé en 1972 à partir d'une équipe de recherche "Etudes des lasers et de leurs applications" constituée en 1960 grâce à une Chaire de Physique de l'Ecole Polytechnique. Ce laboratoire commun EP / ENSTA comptait une cinquantaine de personnes au début des années 80, période à laquelle le LOA est devenu le précurseur français du développement des lasers ultrabrefs et de leurs applications. C'est le deuxième laboratoire au monde à avoir développé avec succès un laser femtoseconde (oscillateur sub-picoseconde). Ces lasers de faible énergie ont permis aux chercheurs du laboratoire de rapidement lancer les premières applications notamment pour l'étude des phénomènes ultrarapides en physique du solide et en optique non linéaire. Le LOA n'a ensuite cessé de développer cette thématique en réalisant des lasers de plus en plus énergétiques et en effectuant les expériences d'interaction laser-matière associées. Associé à l'INSERM en 1984 (U 275), puis au CNRS en 1989 (URA 1406), le LOA est devenu une UMR en 1997 et comptait environ 80 personnes permanentes et non permanentes.

Grâce aux développements importants réalisés au LOA durant les années 80, il a été possible de produire au début des années 90 des impulsions lasers jusqu'à environ 30 fs ($1\text{fs} = 10^{-15}\text{s}$) de durée et d'énergie de plusieurs Joules. A cette époque, ceci représentait un bond en intensité de plusieurs ordres de grandeur par rapport aux lasers existants commercialement ou dans les laboratoires de recherche au niveau international. Ce fut surtout le commencement d'un ensemble de thèmes entièrement nouveaux au LOA, tous liés à l'interaction laser-plasma. La présence sur site de ces premiers systèmes lasers femtosecondes intenses au monde a conduit à la création de nouvelles équipes de recherche sur ce thème, qui ont joué un rôle pionnier au niveau international dans le développement de la physique de l'interaction en régime femtoseconde. C'est maintenant devenu une thématique forte du laboratoire, avec de nombreuses percées scientifiques depuis plus d'une quinzaine d'années pour lesquels les chercheurs du LOA sont les auteurs principaux. Depuis 2008, on peut noter: Rev. Mod. Physics 2013 (Sources de rayonnements X relativistes créées par laser), Nature Physics 2012 (contrôle attoseconde de plasma), 3 Nature Photonics 2012 (source X Compton laser-plasma, Phare attoseconde, laser X CPA), Nature Communication 2013 (mécanisme d'injection d'électrons), Nature Communication 2012 (imagerie XUV de domaines magnétiques), Nature Physics 2011

(faisceaux d'électrons de quelques fs), Nature Physics 2008 (principe des accélérateurs plasma), Phys. Rev. Lett. 2013 (Emission Ciliaire). Chercheurs et étudiants ont ainsi pu être lauréats de 5 prix en moyenne par an ces cinq dernières années, dont 4 bourses européennes ERC, 4 prix de valorisation de la recherche et 12 prix de thèse nationaux ou internationaux dont 2 prix de Thèse ParisTech.

Le LOA a commencé à jouer un rôle moteur au niveau européen dès 1988. Grâce aux actions de soutien à la recherche de la Communauté Européenne, le laboratoire acquiert les moyens de mettre au point une source laser femtoseconde intense pour l'étude des atomes soumis à des champs électromagnétiques intenses (programme Stimulation for Science). En 1992, le LOA devient un pôle européen en matière de lasers femtosecondes intenses et de phénomènes ultrarapides en étant sélectionné dans le programme Capital Humain et Mobilité. Cette position est confortée en 1996 en faisant partie du premier programme européen (laser-net qui donnera naissance à LaserLab) qui regroupe les 5 grandes infrastructures lasers européennes.

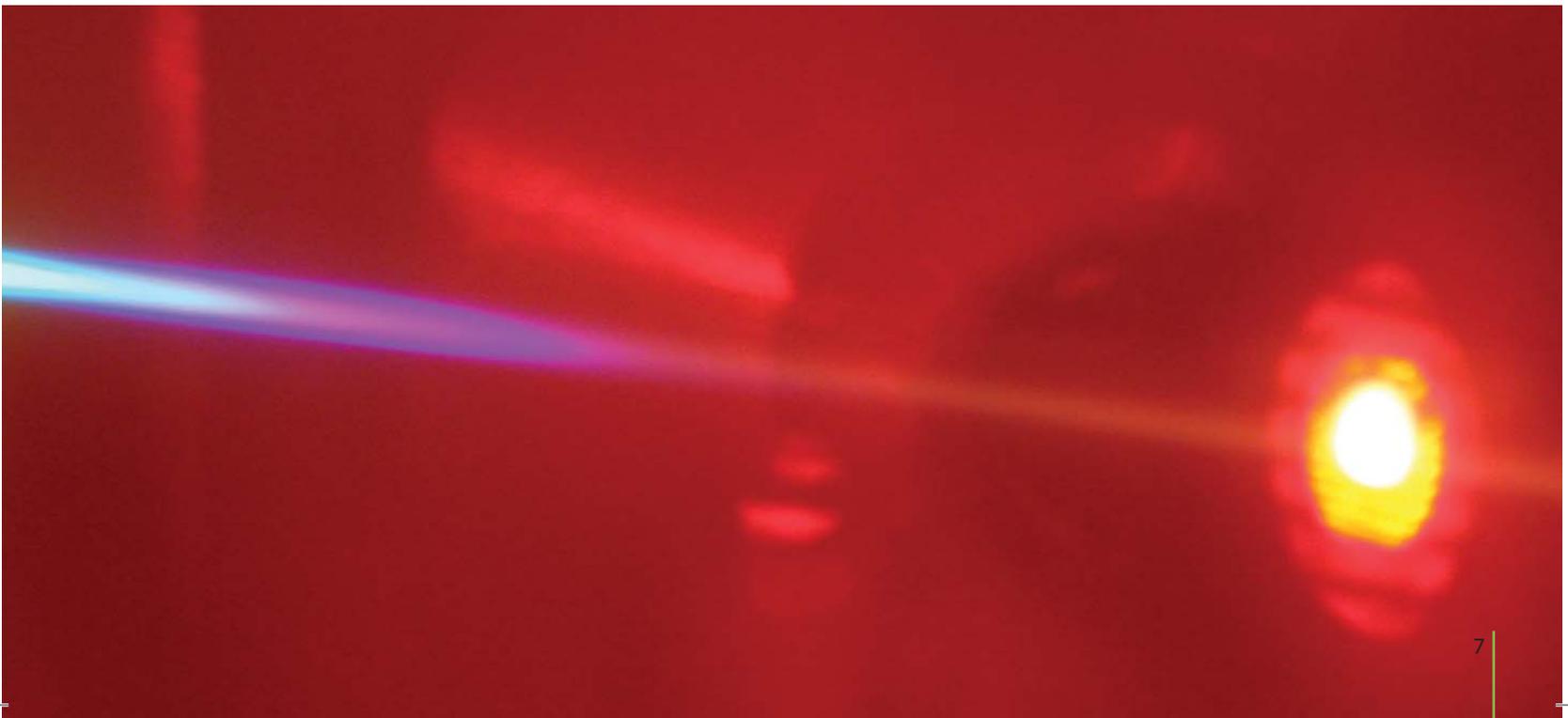
Le LOA fait toujours partie de ce programme qui s'est maintenant étendu à de nombreux autres partenaires. Ses objectifs sont multiples. Le LOA participe à la formation d'un réseau européen interdisciplinaire et compétitif de laboratoires lasers nationaux, avec pour buts de renforcer le leadership européen dans la recherche laser et applications à travers le développement d'activités de recherches communes, et de proposer un programme d'accès transnational des installations lasers des différents laboratoires partenaires. LASERLAB-EUROPE est entré dans sa troisième phase de coopération scientifique. 20 facilités laser, dont le LOA, offrent un accès à leurs installations pour les équipes de recherche européennes.

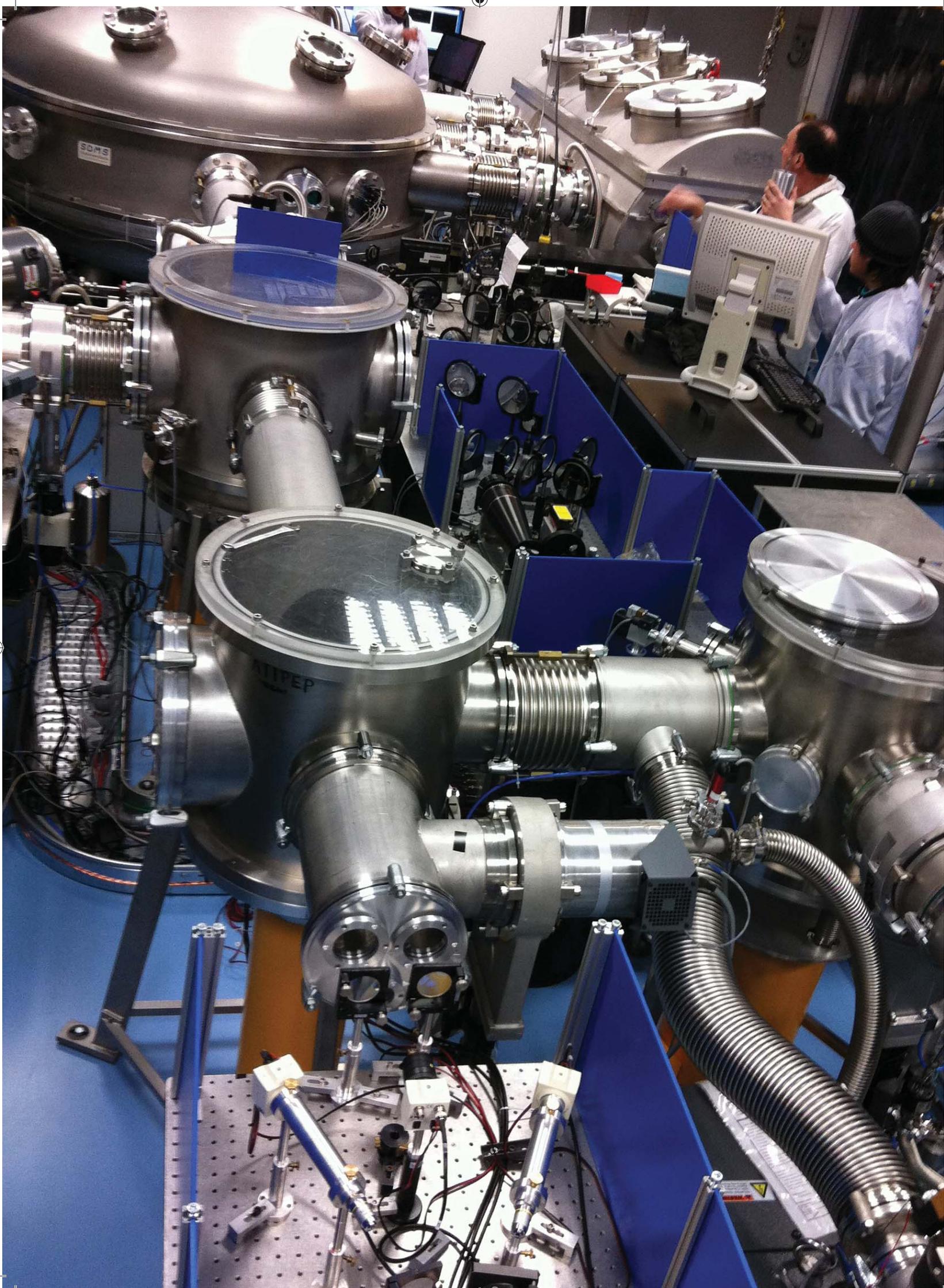


Plus d'une soixantaine de laboratoire, dont une trentaine en Europe et 6 en France portent maintenant le domaine scientifique des lasers intenses et applications. La construction d'infrastructures expérimentales de toutes tailles est en forte croissance dans le monde. Il existe un continuum de lasers allant de systèmes compacts à haute cadence (plusieurs kHz) tenant sur une table à la haute énergie basse cadence (quelques tirs par jour) qui seront des infrastructures à l'échelle de plusieurs bâtiments.

Dans ce contexte très concurrentiel, le LOA développe et offre aux équipes de recherche (internes ou externes sous forme de collaborations ou accès par comités) des systèmes lasers ultrabrefs compacts, intenses, à haute cadence et ayant des durées d'impulsion poussées jusqu'à leur limite pour la réalisation d'expériences complexes d'interaction et d'application. La physique fondamentale des plasmas créés par laser, la production de sources compactes de rayonnements et de particules énergétiques, les études de propagation sur de longues distances des faisceaux lasers intenses, les applications multidisciplinaires de ces sources ultrabèves en physique du solide, dans le médical ou pour la défense, et la valorisation sociétale des techniques plasma-laser sont les axes principaux de développement du laboratoire.

Propagation non-linéaire de laser femtoseconde intense dans l'air.





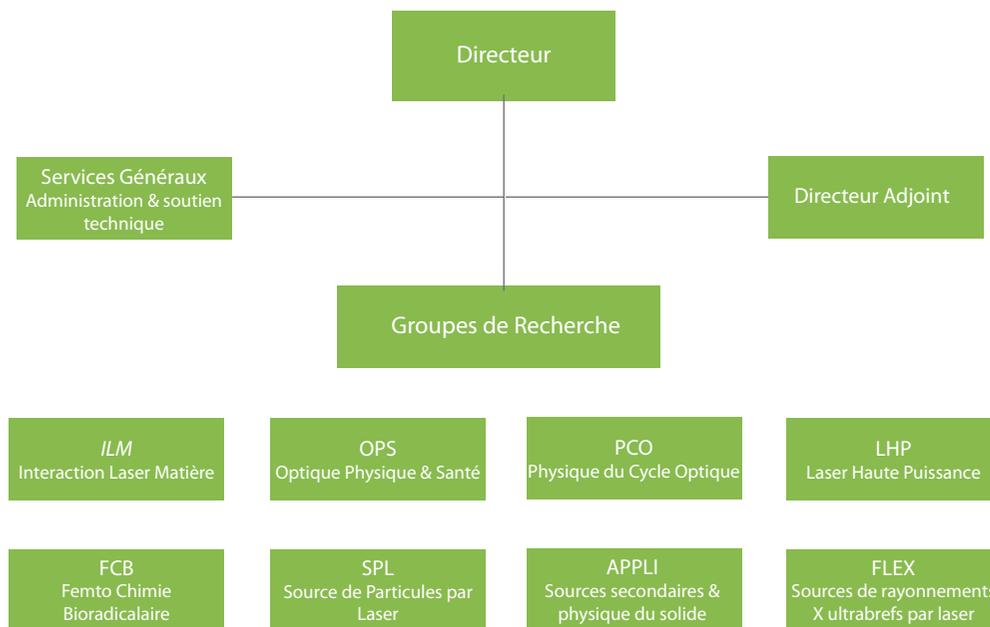
Organisation et infrastructures

Le LOA: 8 sites expérimentaux répartis sur 3500 m² dans le centre de l'ENSTA-Yvette à Palaiseau.

Les systèmes lasers ultrabrefs du laboratoire couvrent une gamme d'énergie du mJ jusqu'à plusieurs joules, des cadences de répétition de la fraction de Hz jusqu'à plusieurs kHz, et des durées d'impulsion de quelques dizaines de femtosecondes à quelques cycles optiques (4-5 fs). Ces systèmes sont accompagnés de sites expérimentaux pour effectuer les études d'interaction laser-matière. Deux sont radioprotégés pour la réalisation d'expériences avec les lasers les plus intenses qui nécessitent une protection contre les ray-

onnements ionisants. Le laser le plus énergétique du laboratoire (Salle Jaune) vient d'être totalement rénové au niveau des infrastructures, des performances, du nombre et de l'implantation des sites d'expériences. Ce projet a été financé à hauteur de 2 M€ à travers les dotations des tutelles, des contrats du ministère de la Recherche ANR, d'un Equipement d'Excellence et d'un contrat européen ERC principalement. Le projet a débuté en 2009. Les premiers tirs après rénovation ont eu lieu en juin 2013 après 18 mois

Organisation du LOA



Les 8 groupes de recherche développent des systèmes lasers ultrabrefs intenses, étudient la physique de l'interaction laser-matière, la physique des plasmas, ainsi que la production et les applications des sources ultrabrèves de rayonnements et de particules énergétiques.

d'arrêt du site. Le laser délivre maintenant une puissance de 120 TW sur cible distribuée sur plusieurs faisceaux. L'objectif principal a été une augmentation du nombre de faisceaux intenses disponibles pour les expériences. 3 à 6 faisceaux synchronisés

M€ 2,6

Investissement financier réalisé en réhabilitation d'infrastructures du LOA (bâtiments, hors matériels) (TTC).

spatialement et temporellement ainsi que 3 nouveaux sites expérimentaux dédiés à des thématiques spécifiques sont disponibles pour réaliser des expériences complexes de physique d'interaction laser-plasma. Un laser femtoseconde intense transportable a également été acquis en 2009 (système Salle Bleue ou ENSTA-Mobile). C'est le deuxième système au monde de ce type. Il permet de

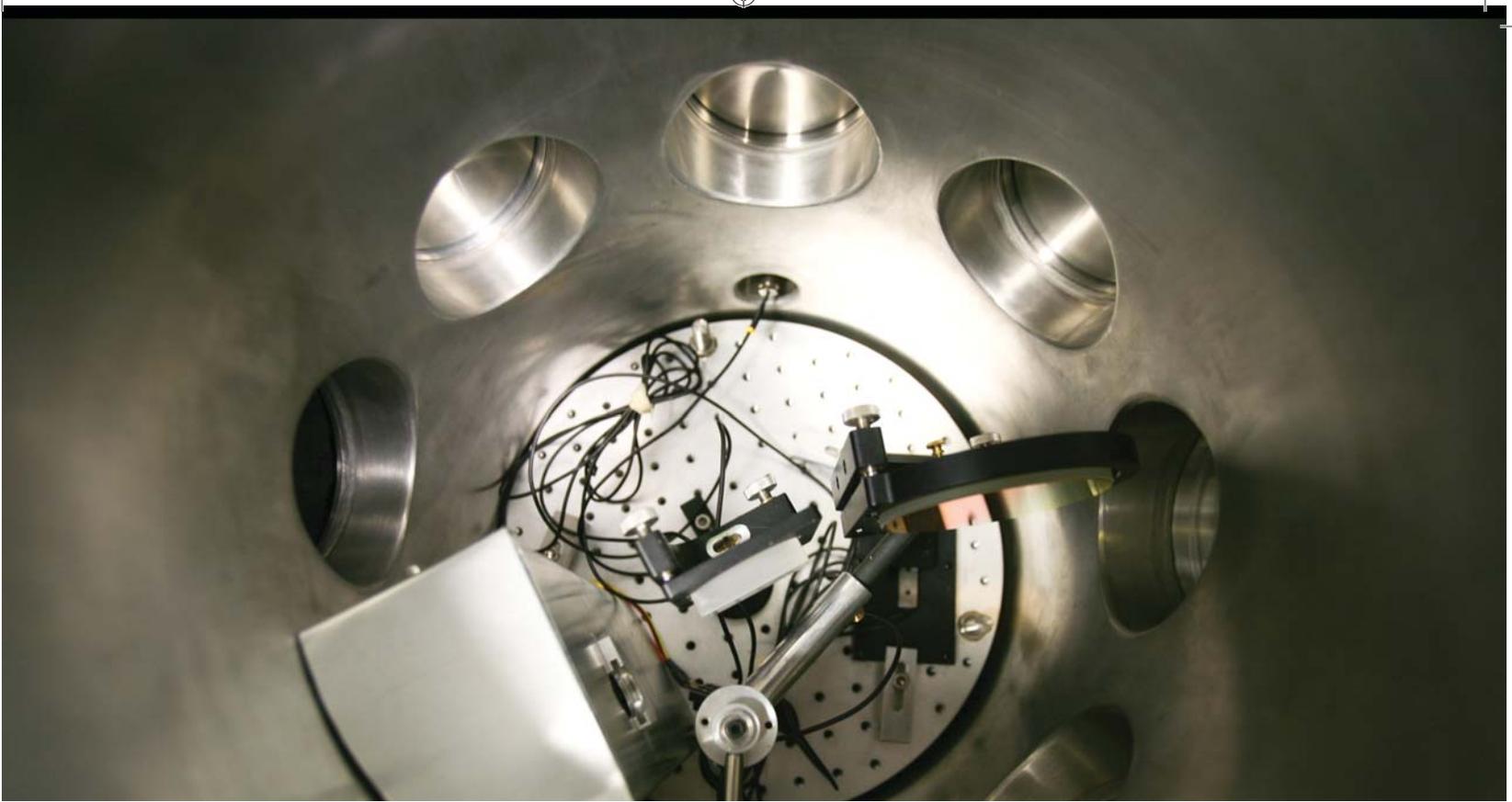
réaliser de nombreuses expériences de filamentation longue distance en conditions réelles en France et à l'étranger. Ce programme est financé par un contrat DGA du type PEA.

Le LOA développe plus particulièrement la technologie laser intense de durée d'impulsions de quelques femtosecondes, proche de la durée du cycle optique. Le programme Salle Noire a permis en 2013 de mettre en exploitation le système 2.0 (5 fs, 3 mJ, CEP, 1 kHz), avec l'objectif de prendre la suite du laser Salle Rouge (8 mJ, 50 fs, 1 kHz), exploité depuis plus de 10 ans. La Salle Noire 3.0 est maintenant en phase de développement avec pour objectif une augmentation significative en énergie (5-20 fs, 100 mJ-1J, CEP, 1 kHz).

Ces systèmes lasers et leurs sites expérimentaux associés seront installés dans une

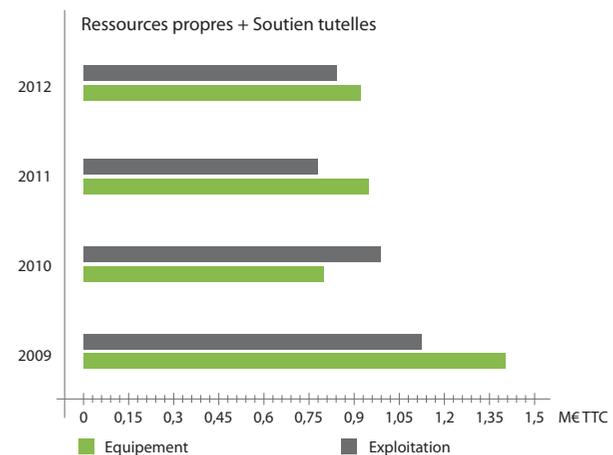
Financement Sites Expérimentaux hors ressources propres



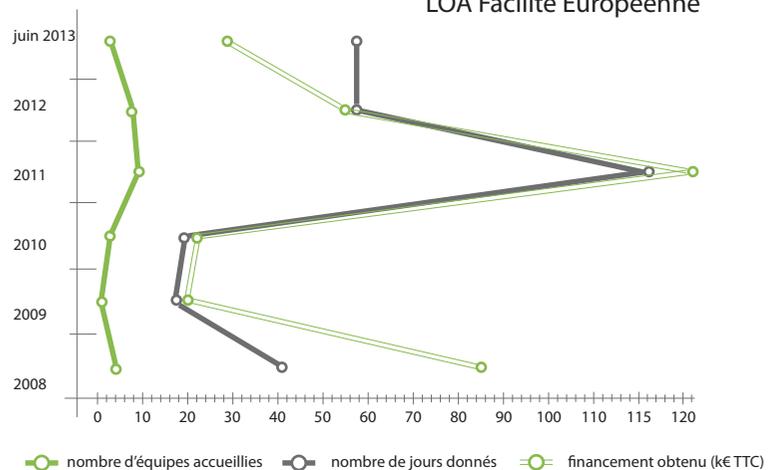


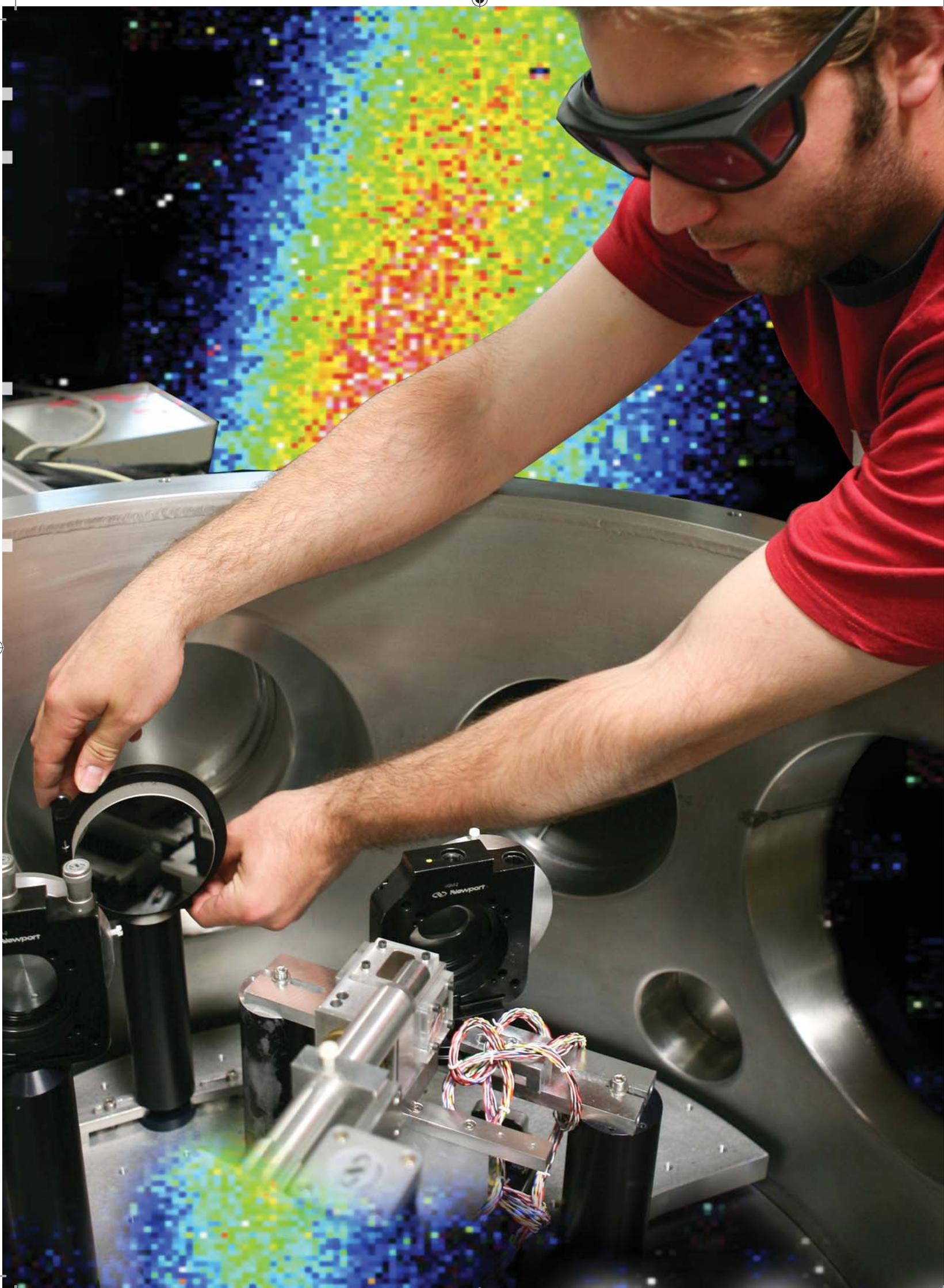
nouvelle infrastructure, le bâtiment P du LOA, qui rendra disponible 1000 m² de surface expérimentale supplémentaire mi-2014 après plusieurs mois de rénovation. Ce programme va rendre accessible l'étude de la physique de l'interaction et des plasmas en régime relativiste avec ce type de laser compact, de durée d'impulsion ultrabrève, et à haute cadence. Il va permettre la réalisation d'importants contrats récemment acceptés: ERC, Equipement d'Excellence ou Sésame, et va également bénéficier de la forte synergie avec la société Thalès avec laquelle un laboratoire commun de développement de technologie laser est en cours de création. Cette infrastructure va notamment accueillir les activités du nouveau groupe APPLI, créé en janvier 2013 pour affirmer l'activité de recherche sur les applications des sources secondaires créées par laser, ainsi que la nouvelle spinoff du laboratoire, SourceLab, qui promeut le transfert technologique des re-

Equipement et Exploitation des Systèmes



LOA Facilité Européenne

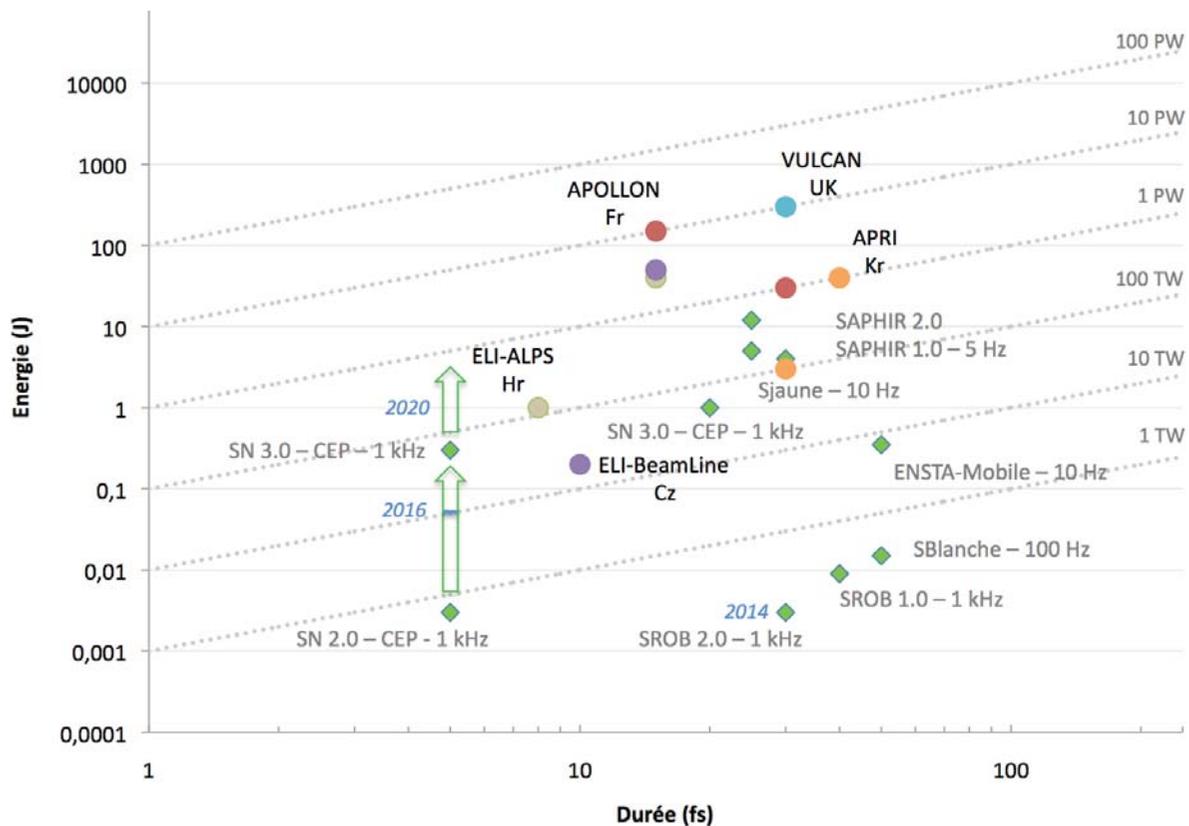




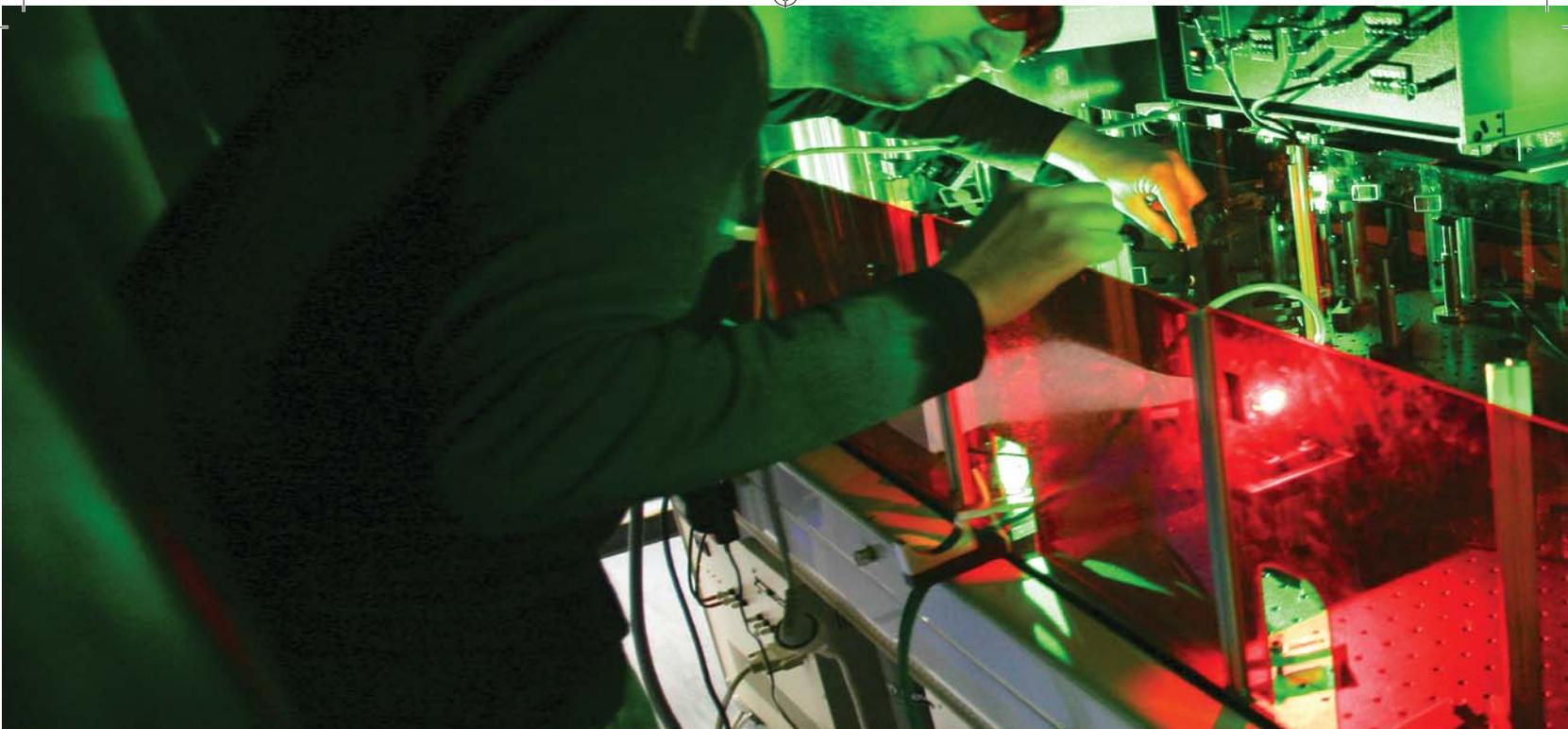
cherches issues de l'interaction laser-plasma.

Les sites expérimentaux du LOA accueillent les expériences réalisées en interne par les équipes du laboratoire ainsi que les expériences effectuées dans le cadre de la Facilité Européenne LaserLab et l'appel d'offre national des laboratoires LOA / CELIA / SPAM. L'ensemble est géré par la mise en place de plannings annuels d'utilisation des systèmes expérimentaux pour les principaux sites. 20% du temps de faisceau disponible annuellement est réservé pour l'accès transnational à nos infrastructures de recherche lasers et applications pour les chercheurs ou équipes de recherche appartenant aux états membres euro-

péens ou états associés. Depuis janvier 2008 à juin 2013, 330 jours lasers ont été donnés en accès aux équipes européennes, ce qui représente un apport financier pour le laboratoire de 350 k€. Cette fonction d'accueil nous permet notamment de recevoir de nombreux visiteurs au laboratoire. Durant la période évaluée, 170 séjours de visiteurs nationaux ou internationaux ont été organisés, dont une majorité venant pour la réalisation de "runs" expérimentaux à travers le programme européen LaserLab et les collaborations en dehors des appels d'offre (taux de 70% sur la période 2008-2013 sur l'ensemble des expériences réalisées).



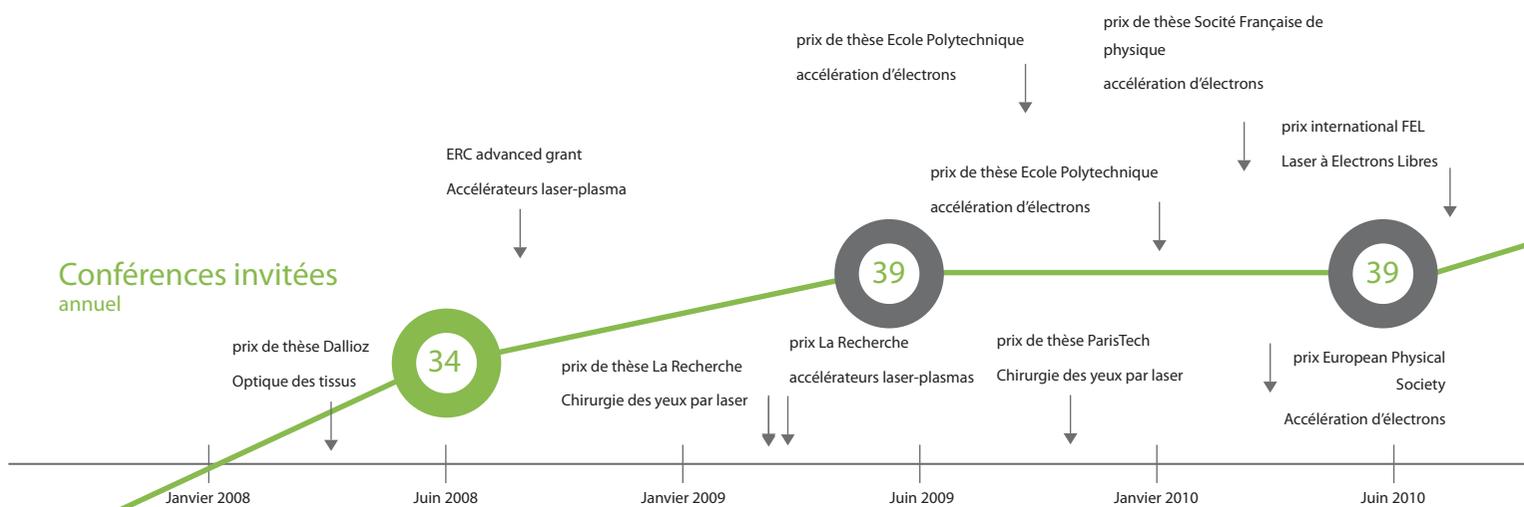
Systèmes du LOA et Grands Instruments nationaux et internationaux que les équipes du laboratoire vont utiliser pour développer leurs thèmes de recherche. Des expériences sur VULCAN et APRI (MoU signé) sont déjà effectuées en attente des grandes infrastructures européennes ELI et française APOLLON.

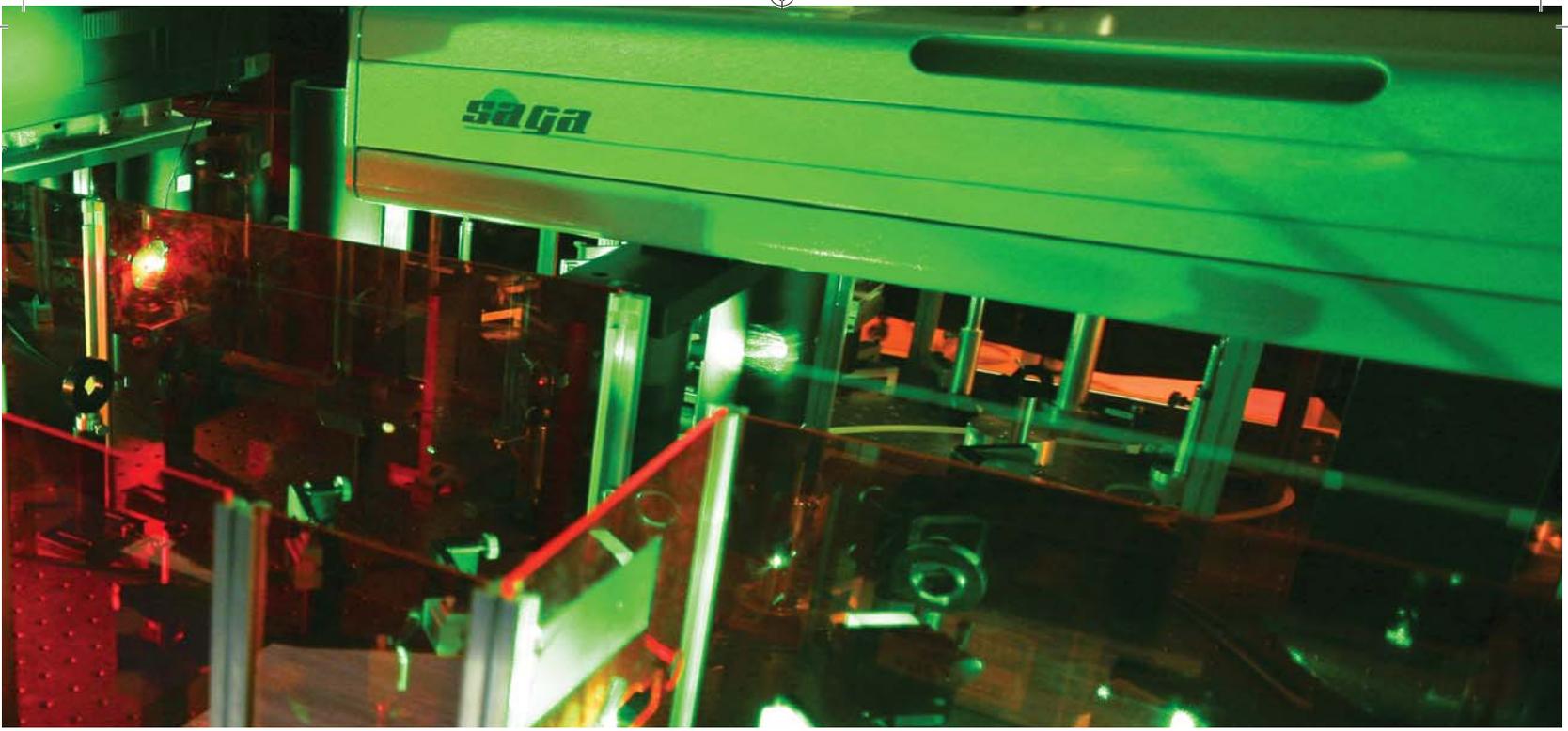


Faits marquants

Les équipes du LOA ont réalisé plusieurs percées scientifiques, notamment: le contrôle attoseconde de plasma-laser (Nature Physics 2012), le développement de nouvelles sources X Compton laser-plasma, Phare attoseconde et laser X CPA (3 Nature Photonics 2012), la démonstration d'un nouveau mécanisme d'injection d'électrons (Nature Communication 2013), l'imagerie XUV femtoseconde de domaines magnétiques (Nature Communication 2012), la production

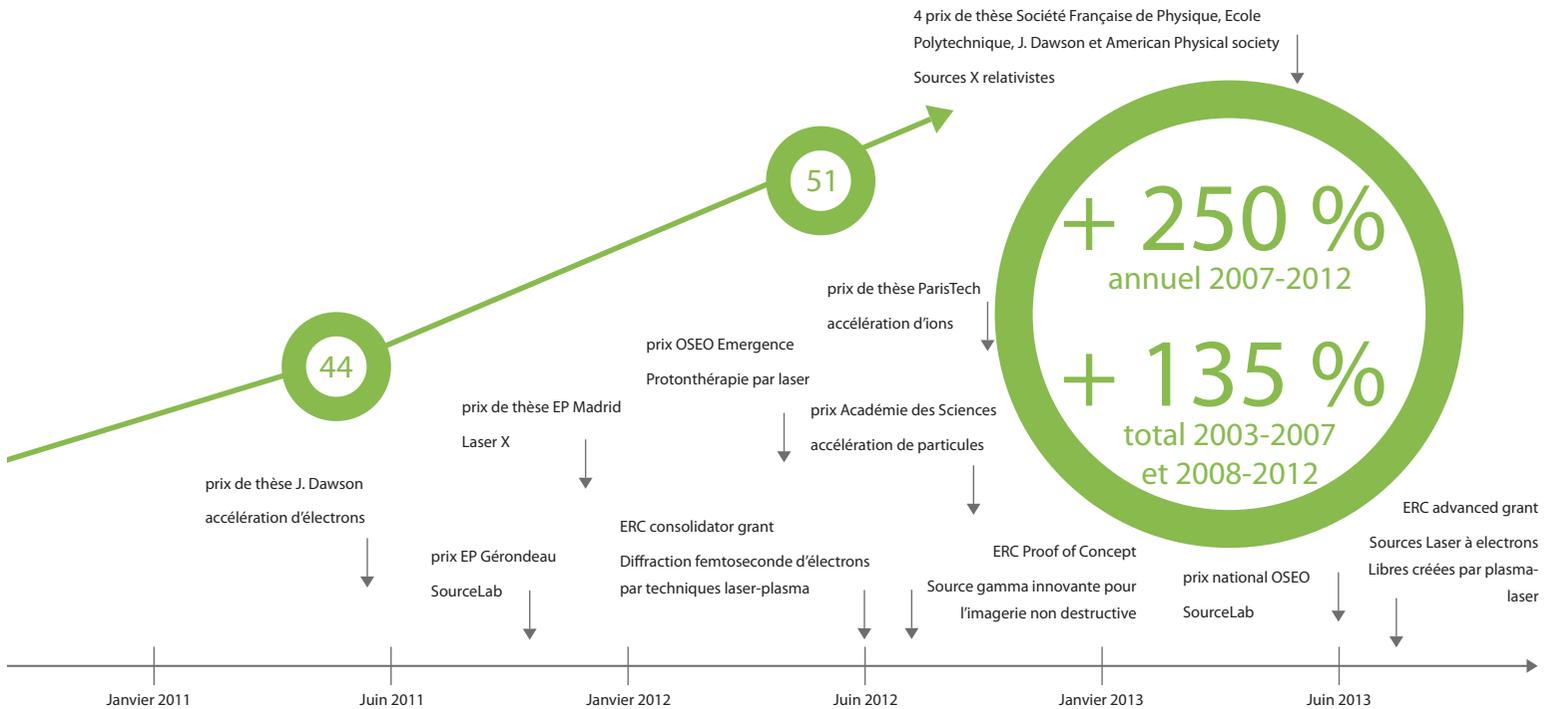
de faisceaux d'électrons de quelques fs (Nature Physics 2011), la mise en évidence d'un nouveau mécanisme d'optique non linéaire: l'émission Ciliaire (Phys. Rev. Lett. 2013). Des états de l'art sur le principe des accélérateurs laser-plasma (Nature Physics 2008) et sur les sources innovantes de rayonnement X produites en régime d'interaction relativiste (Review of Modern Physics 2013) ont été publiés.





Etage d'amplification de puissance du laser femtoseconde intense Salle Jaune.

Laboratoire d'Optique Appliquée	1998-2002	2003-2007	2008-2012
publications avec comité	242	197	250
conférences invitées	77	154	207
conférences orales/posters	197	136	241
Thèses	13	22	26
HDR	3	5	10
prix	1	3	20

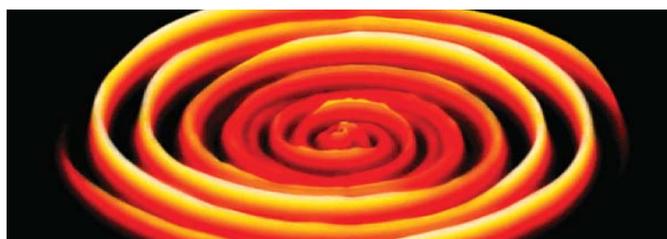


Résultats scientifiques majeurs

La physique de l'interaction entre un laser femtoseconde intense avec un plasma est très riche. Elle donne accès à des recherches fondamentales multidisciplinaires à haut facteur d'impact, avec la perspective d'applications sociétales, industrielles ou d'intérêt pour la défense.

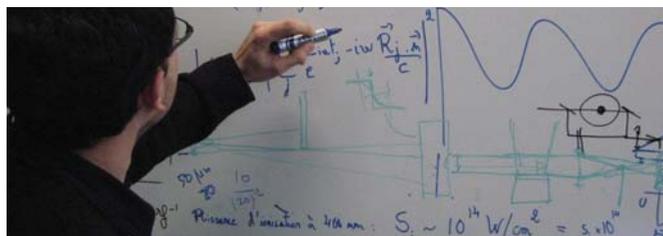
Contrôle attoseconde de plasma

Pour observer des phénomènes ultrarapides tels que le mouvement des électrons au sein de la matière, les chercheurs ont besoin de sources capables



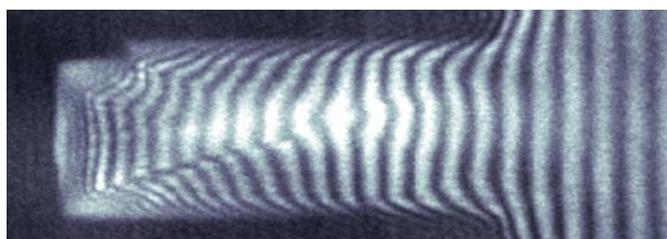
Sources X relativistes femtosecondes

Des résultats pionniers ont été obtenus par les équipes FLEX et SPL pour améliorer les propriétés des sources X ultrabrèves produites par laser-plasma: cohérence, synchronisation, compacité et domaine



Sources X cohérentes

L'équipe FLEX a réalisé une étude théorique pour montrer que la technique CPA (Chirped Pulse Amplification) utilisée depuis plus de 25 ans sur les



Electrons énergétiques femtosecondes

Les accélérateurs laser-plasma peuvent produire des faisceaux ultrabrefs d'électrons de qualité, jusqu'à des énergies de plusieurs GeV, à partir de modules d'accélération de seulement quelques centimètres.



Emission ciliaire femtoseconde

Des impulsions lumineuses ultrabrèves intenses qui peuvent sculpter précisément des matériaux solides peuvent générer des motifs en arc en ciel éblouissants qui révèlent des informations très précises sur



de produire des rayonnements lumineux extrêmement brefs et énergétiques. L'équipe PCO a réussi à manipuler de manière contrôlée le mouvement collectif des électrons dans un plasma. Ils ont ainsi pu produire des impulsions électromagnétiques attosecondes isolées spatialement à des longueurs d'onde dans le domaine de l'extrême ultraviolet et contrôler de manière cohérente la dynamique du plasma sur une fraction de cycle optique avec une énergie caractéristique dans la gamme multi-kiloélectronvolt - deux ordres de grandeur plus élevés que ce qui a été réalisé jusqu'ici dans les atomes et les molécules. Ce travail pionnier est une étape importante vers le contrôle de la dynamique de charges dans des expériences de plasmas créés par laser et pour la production de plusieurs impulsions attosecondes isolées et parfaitement synchrones.

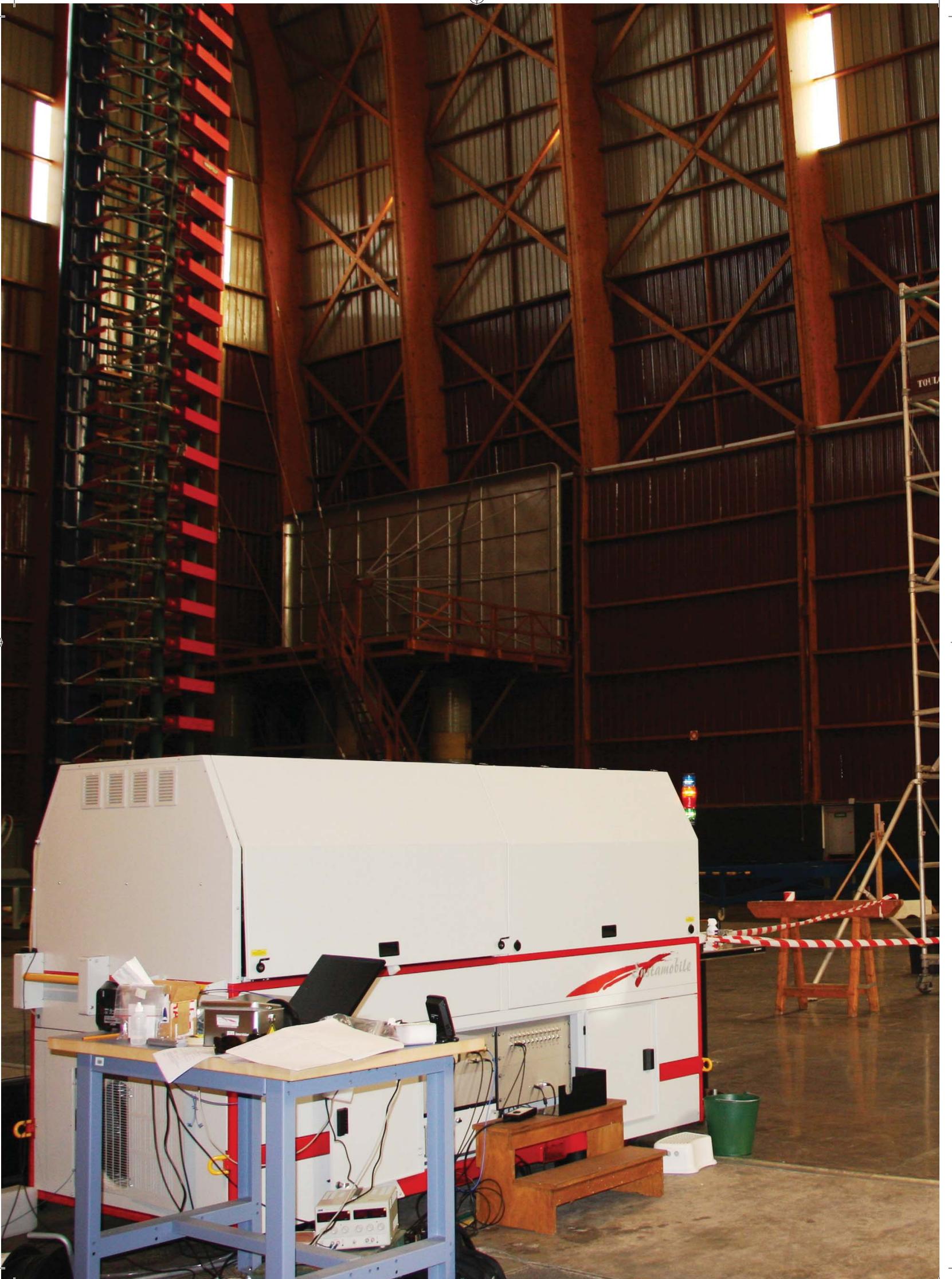
spectral. Une nouvelle méthode permettant d'étendre le domaine spectral des faisceaux X ultrabrefs au rayonnement gamma a été démontrée, la diffusion Compton inverse, au cours de laquelle un faisceau d'électrons énergétiques collisionne avec un faisceau laser femtoseconde intense dans un jet de gaz d'hélium. Cette méthode, compacte, robuste et entièrement optique, permet de produire des flashes de rayonnement gamma plus de 10 000 fois plus brillants que ceux produits par les sources conventionnelles existantes. Des expériences totalement inédites peuvent être envisagées comme par exemple l'étude in-vivo et en temps réel des mécanismes de destruction des cellules cancéreuses par rayons X ou l'imagerie à très haute résolution temporelle et spatiale.

lasers visibles et infrarouges femtosecondes peut être transposée dans le domaine X en utilisant un plasma chaud créé par l'interaction d'un laser infrarouge femtoseconde intense avec une cible solide.

Des performances équivalentes aux meilleurs Lasers à Electrons Libres LEL sur la gamme spectrale de 3-50 nm sont attendues. De même, des expériences de démonstration réalisées avec les sources ultrabrèves XUV Harmoniques générées dans les gaz ($\lambda=20$ nm) ont continué à être mises en place au LOA avec, en particulier, la mise en évidence expérimentale d'une dynamique de désaimantation ultrarapide (100 fs) de domaines magnétiques sondée à l'échelle nanométrique suite à une excitation laser.

A partir de mesures spectrales large bande du rayonnement de transition cohérent, le groupe SPL a pu mesurer la durée du faisceau d'électrons (1.4 à 1.8 fs rms) produit de manière contrôlée par injection optique et montrer que ces durées sont plus courtes que celles produites par les accélérateurs de particules conventionnels. En collaboration avec le groupe FLEX, les chercheurs du groupe SPL ont également démontré pour la première fois l'existence d'un nouveau mécanisme d'injection: l'auto-injection longitudinale, qui conduit à une accélération beaucoup plus stable et une meilleure qualité des faisceaux d'électrons. L'amélioration de la stabilité de ces accélérateurs est un enjeu déterminant pour leurs applications futures.

l'endommagement de la surface de matériaux. Ce nouveau phénomène d'optique non linéaire vient d'être découvert par l'équipe ILM du LOA à partir de l'interaction entre un laser intense ultrabref et un solide transparent: la lumière blanche ciliaire. Ce processus est produit lors de l'ablation laser de matériaux diélectriques transparents. Il est produit par la diffraction non linéaire de la lumière laser générée par le cratère d'ablation formé de nanostructures. Il permet d'observer en temps réel et in-situ le procédé d'ablation par laser, qui est une technique utilisée dans des domaines aussi variés que la chirurgie dentaire ou la préservation des oeuvres d'art.



Avancées scientifiques - Groupe ILM

Interaction Laser-Matière

L'équipe ILM s'intéresse à la propagation non linéaire des impulsions lasers femtosecondes intenses dans les milieux transparents, et plus particulièrement au phénomène de filamentation laser. Ce phénomène, qui apparaît spontanément lors de la propagation dans l'air d'un faisceau de quelque GW, se traduit par la contraction spatiale de l'impulsion laser pour former un mince canal de lumière intense laissant dans son sillage une colonne de plasma. La possibilité qu'offre la filamentation de générer dans l'air une intensité élevée à de grandes distances du laser permet d'envisager beaucoup d'applications telles que le guidage de la foudre, la génération de rayonnement THz à distance, l'antenne plasma virtuelle ou le LIDAR.

Cette thématique mobilise aujourd'hui une grande communauté scientifique au niveau international, en particulier aux Etats Unis et en Chine qui ont récemment lancé des programmes de recherche d'ampleur. Depuis la mise en évidence de ce phénomène à la fin des années 90 notre équipe s'est imposée comme une des leaders du domaine, et particulièrement en France.

Nous collaborons étroitement avec la Direction Générale de l'Armement (DGA) et des partenaires industriels pour le développement d'applications liées aux filaments laser, par le biais de contrats de recherche. Ces contrats nous ont permis de faire l'acquisition en 2009 d'une nouvelle source laser TW transportable baptisée ENSTAmobile. Ce laser de 300 mJ pour 50 fs de durée nous a permis de réaliser des campagnes expérimentales au CEAT de Toulouse, au LMA de Marseille, ainsi que des campagnes de propagation laser à longue distance en extérieur sur le campus de l'école Polytechnique. En parallèle nous nous intéressons aussi à des aspects plus fondamentaux du phénomène de filamentation laser et de la propagation nonlinéaire d'impulsions femtosecondes.

Les études fondamentales liées à la filamentation

Récemment l'étude du processus de multifilamentation et de l'interaction entre plusieurs filaments lasers est devenue une thématique forte dans le domaine de la filamentation car le contrôle de cette interaction permet d'optimiser par des méthodes "tout optique" les caractéristiques des filaments et des rayonnements secondaires qu'ils émettent. Nous avons ainsi montré que l'interaction de deux filaments permettait d'échanger efficacement de l'énergie entre deux faisceaux, d'augmenter la génération de 3^{ème} harmonique dans un filament, ou

même de nettoyer spatialement et temporellement une impulsion femtoseconde.

- Echange d'énergie par un réseau de plasma.

Nous avons mis en évidence pour la première fois, qu'en formant un réseau de plasma mobile à l'intersection de deux filaments dans un gaz, il était possible de transférer de l'énergie d'un faisceau laser à l'autre avec une efficacité qui peut atteindre 50 %, ce qui excède largement les transferts d'énergie précédemment observés dans la littérature qui se limitaient à quelques pourcents. Par une mesure doppler nous avons caractérisé la vitesse de déplacement du réseau de plasma, confirmant ainsi nos prédictions théoriques.

La décroissance du réseau de plasma a été mesurée dans différents gaz atomiques et moléculaires par des moyens de diffractométrie du plasma et de réflectivité d'une sonde à 400 nm. Ces mesures nous ont permis de conclure qu'une diffusion ambipolaire est responsable de la disparition de réseau dans les gaz atomiques alors que la recombinaison à trois corps domine dans les gaz moléculaires.

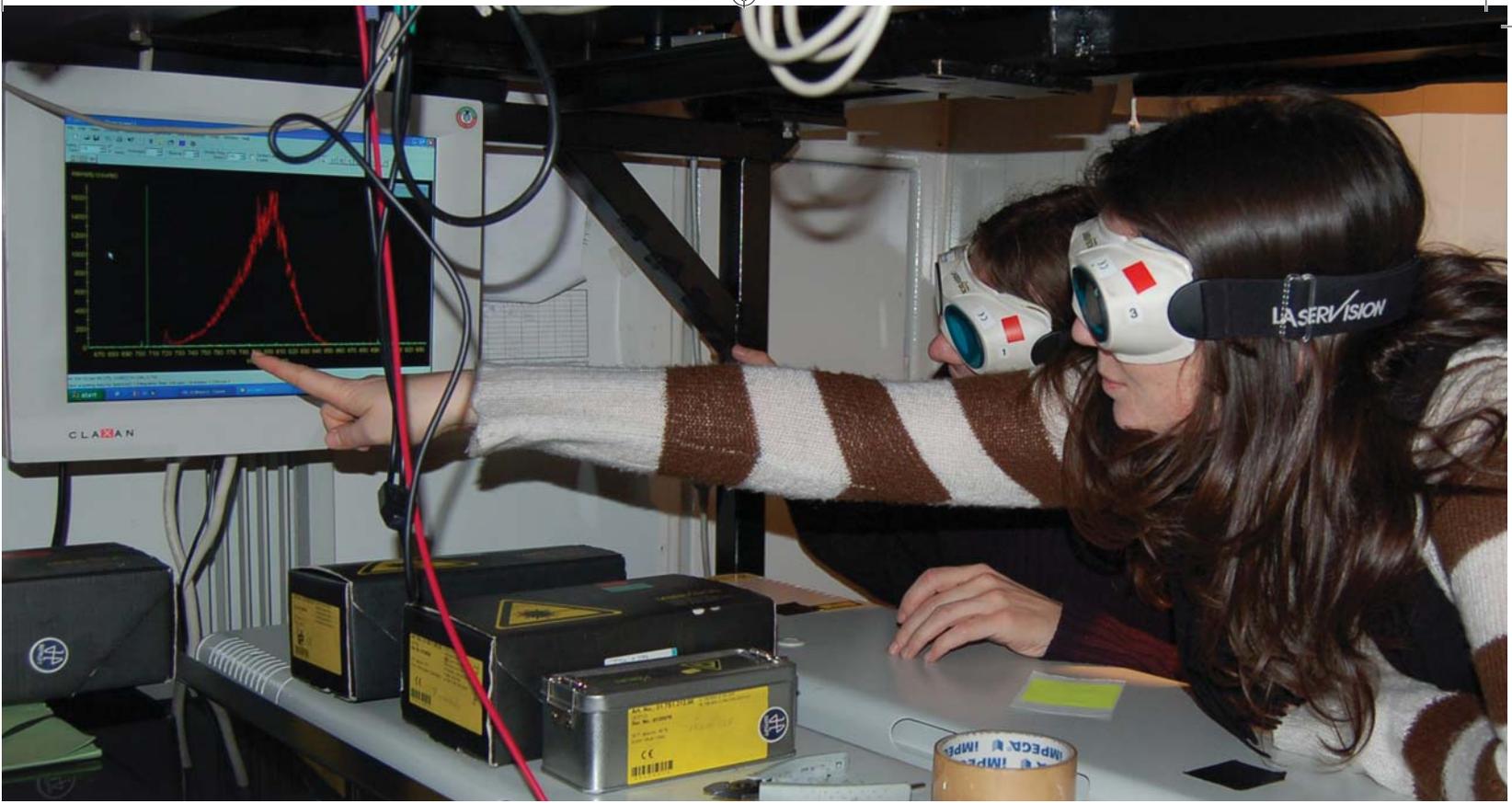
- Nettoyage spatio-temporel du faisceau par interaction d'impulsions lasers filamentées dans l'air.

Dans la continuité de cette étude nous avons récemment mis à jour la possibilité de nettoyer spatialement et temporellement une impulsion laser femtoseconde par l'interaction d'un faisceau sonde avec deux faisceaux filamentés. Le principe de l'expérience est le suivant : deux faisceaux

pompes contra-propagatifs se croisent en formant un filament dans l'air. Une sonde de plus faible puissance focalisée au centre de la région ionisée par les deux filaments et coïncidente temporellement avec les deux pompes génère deux faisceaux, un réfléchi et un transmis. Le faisceau signal réfléchi sur le réseau de plasma généré à l'intersection des trois faisceaux est alors renvoyé dans la direction de la sonde comme dans le cas d'un effet de conjugaison de phase. Ce faisceau signal présente des caractéristiques spatio-temporelles très supérieures à celles de la sonde incidente. Ainsi, quelque soit le profil spatial de la sonde, le faisceau réfléchi est gaussien et son contraste temporel est amélioré de plus de 3 ordres de grandeur. L'efficacité en énergie de ce nouveau type de miroir plasma à base de filaments générés dans l'air peut atteindre 10 à 20%. Ce miroir pourrait trouver des applications dans des situations où des impulsions femtosecondes monomodes et à contraste élevé sont nécessaires, par exemple en début de chaîne laser dans des systèmes double CPA.

- Génération de rayonnement THz par filamentation et courants électroniques.

La génération d'impulsions THz intenses et larges bandes est un sujet en pleine explosion depuis une dizaine d'années avec le développement de la technique de spectroscopie THz résolue en temps (THz time domain spectroscopy ou TDS). Cette technique est bien plus puissante que les méthodes de spectroscopies classiques puisqu'elle permet d'obtenir simultanément une information sur la phase et sur l'amplitude du champ électrique de l'impulsion. Elle trouve de



nombreuses applications dans l'analyse et l'imagerie d'objets ou de systèmes physiques dans un domaine du spectre encore largement sous-exploité par manque de sources efficaces. Une des limitations actuelles des sources THz réside dans l'intensité des sources impulsionnelles disponibles qui est généralement limitée par le seuil de dommage des semiconducteurs ou des cristaux non linéaires utilisés pour les générer à partir d'impulsions lasers. Les sources THz basées sur la génération d'un plasma dans un gaz à pression atmosphérique apportent une alternative prometteuse puisqu'elles ne présentent en théorie aucune limitation dans l'énergie de l'impulsion laser incidente. Ainsi, nous avons récemment montré que les filaments de plasmas produits dans l'air étaient une source robuste de rayonnement THz cohérent large bande et qu'ils présentaient de plus le gros avantage de pouvoir être générés à grande distance du laser (démonstration jusqu'à une distance de 20 m).

Dans le cadre du contrat ANR jeune chercheur « TIAF » démarré fin 2010, nous avons réalisé une étude approfondie du mécanisme de photocourant à la base de cette radiation THz du filament. A l'aide d'une sonde de courant rapide nous avons mis en évidence pour la première fois la dynamique des courants électroniques longitudinaux dans le filament. Nous avons montré que la direction initiale des électrons libres dépendait de la nature du gaz et de la polarisation du laser. Un modèle théorique de la dynamique des électrons du plasma développé avec des chercheurs du CPHT de l'Ecole Polytechnique et de l'université d'Ottawa montre que le mouvement initial des électrons résulte d'une compétition entre la force laser et la force de Coulomb exercée par le plasma sur les électrons libres.

Par ailleurs nous avons étudié la possibilité d'amplifier le rayonnement THz généré à distance en organisant spatialement et temporellement plusieurs filaments lasers. Nous

avons ainsi réalisé la combinaison cohérente de l'émission de plusieurs filaments et montré que l'intensité THz obtenue augmentait quadratiquement avec le nombre de filaments. De plus le rayonnement THz du réseau de filaments peut être ajusté en jouant sur la phase des filaments, afin d'obtenir une émission THz intense hors d'axe. Cette propriété permet d'illuminer une cible distante avec la radiation THz sans l'endommager avec le faisceau laser de forte puissance.

- Dommages lasers à la surface de solides transparents et émission ciliaire.

Depuis 2012 nous avons commencé une étude du processus de formation de dommages par laser à la surface de solides transparents. Dans ce domaine, de nombreux travaux ont porté sur l'étude de la morphologie des échantillons après l'interaction avec le laser. En revanche l'évolution des impulsions lasers pendant l'interaction est à peine connue. Nous avons cherché à mieux comprendre ce mécanisme d'interaction et l'évolution de l'impulsion et avons observé un nouveau type de génération de lumière blanche baptisé émission ciliaire. L'analyse de cette émission corrélée à des mesures de morphologie et de profilométrie des dommages en fonction du nombre de tirs lasers nous a permis d'interpréter ce phénomène en terme de diffraction nonlinéaire sur les nanoparticules et sur les structures périodiques se formant à la surface du matériaux. Ce travail constitue la première observation de l'évolution des impulsions lasers au cours du processus d'ablation laser.

- Filamentation en dispersion anormale : mise en évidence d'un quasi soliton spatio-temporel.

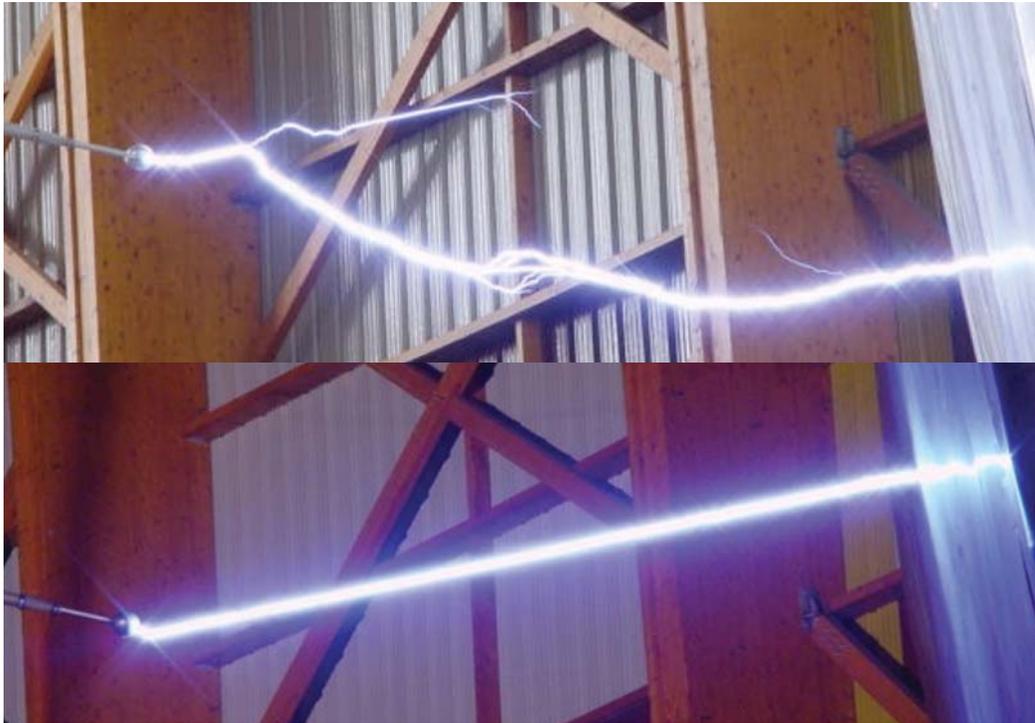
La filamentation laser dans le régime de dispersion anormale a été peu étudiée jusqu'à maintenant. Nous avons effectué cette année des expériences sur ce thème dans un échantillon de silice à l'aide d'impulsions lasers de longueur d'onde centrale $1,9 \mu\text{m}$ issues d'un amplificateur paramétrique optique (OPA) installé en Salle Bordeaux. La caractérisation de l'impulsion filamentée nous a permis de mettre en évidence pour la première fois la formation de quasi solitons spatio-temporels.

Par le biais de photographies de la luminescence du filament, puis en imageant le faisceau à la sortie du bloc de silice, nous avons mesuré le diamètre du filament au cours de la propagation. Contrairement au cas de propagation en dispersion normale (à 800 nm), le filament reste stable et se maintient dans un cœur de $17,2 \mu\text{m}$ de diamètre tout au long de la propagation dans la silice. De plus, le spectre en sortie de filament présente un élargissement et s'étend de $1,5$ à $2,5 \mu\text{m}$. En collaboration avec la société FASTLITE, nous avons mesuré la durée de l'impulsion après filamentation. Les premiers résultats montrent que la durée d'impulsion reste stable sur une quinzaine de millimètres dans le bloc autour de 15 fs (2 cycles optiques).

Les applications

- Filamentation laser à longue distance

Dans le cadre d'un accord de coopération entre la DGA et le DRDC canadien, nous



Guidage d'une décharge électrique dans le canal d'un plasma créé par le laser femtoseconde intense ENSTAMobile

avons réalisé avec l'ONERA, l'ISL et le DRDC une étude sur la possibilité d'utiliser un faisceau TW filamenté comme moyen de contre-mesure optronique à grande distance. Sur le site du DRDC à Valcartier nous avons ainsi mis en évidence pour la première fois la génération de canaux de plasma jusqu'à une distance de 1 km avec un faisceau laser de quelques TW. Par ailleurs, avec l'ONERA nous avons démontré la capacité du faisceau filamenté à éblouir à 1 km des caméras CCD munies d'un hublot et d'un filtre bloquant la longueur d'onde du laser. Ces résultats très prometteurs devraient donner lieu à de nouvelles études notamment pour quantifier les effets de la turbulence atmosphérique et pour transposer ces résultats sur des distances encore plus grandes, par exemple en améliorant la qualité du faisceau laser initial.

- Contrôle de décharges hautes tensions par filaments pour le paratonnerre laser.

Dans le cadre d'une collaboration avec EADS portant sur la réalisation d'un paratonnerre laser, nous avons réalisé en 2009 et 2010 deux campagnes d'essai sur le site du CEAT de Toulouse avec le laser ENSTAMobile. Le but de ces expériences était d'évaluer la sensibilité du guidage de décharges haute tension par des filaments par rapport à l'alignement du faisceau laser sur les électrodes et la capacité d'un filament à détourner une décharge de son point d'attachement naturel. En effet, il était communément admis qu'un contact électrique entre le plasma du filament et les électrodes était nécessaire pour obtenir un guidage efficace de la décharge et pour abaisser le seuil de claquage naturel en créant un chemin préférentiel continu à l'aide du laser. Nous avons mis en évidence la ca-

pacité des filaments lasers à détourner et initier des décharges électriques de 60 cm sans qu'il y ait contact avec les électrodes.

Ces expériences ont été réalisées avec notre chaîne laser terawatt transportable ENSTA-mobile. Ces résultats sont importants dans la perspective du guidage de la foudre par laser où l'on souhaiterait guider un éclair vers un paratonnerre fixe au sol sans avoir nécessairement de contact électrique entre les filaments et le sommet du paratonnerre métallique.

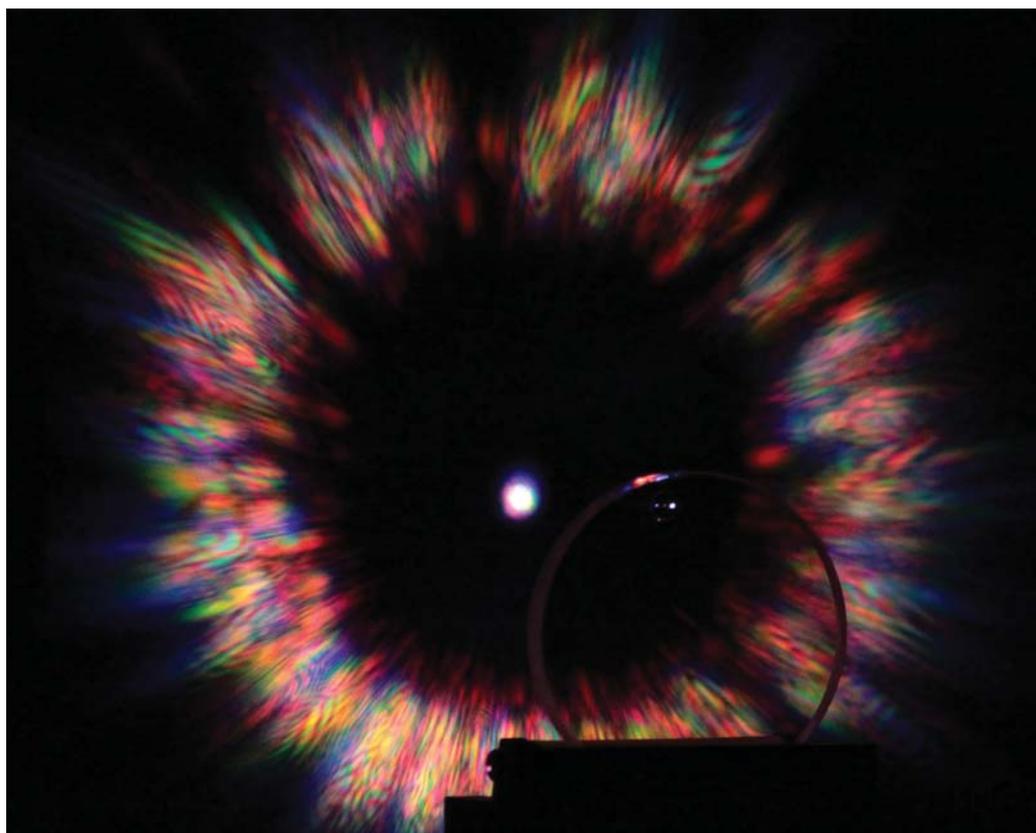
- Antenne virtuelle radiofréquence produite par filamentation laser femtoseconde

Dans le cadre de contrat PEA EPAT de la DGA, nous avons démontré expérimentalement le

concept d'émission électromagnétique dans la gamme des radiofréquences par des filaments de longueurs métriques générés dans l'air. La conductivité électrique et la durée de vie des filaments sont accrues par application d'un champ électrique externe intense. Pour ce faire, une bobine Tesla synchronisable avec les impulsions laser et délivrant 360 kV AC a été implémentée dans la Salle Bleue.

Des décharges électriques guidées par les filaments sur des distances autour de 1,5 m ont été obtenues. L'injection d'un signal RF dans la décharge guidée est ensuite réalisée au moyen d'un coupleur inductif placé autour de celle-ci. La capture des ondes radioélectriques rayonnées par la décharge s'est effectuée à l'aide d'une antenne positionnée à quelques mètres de distance.

Mise en évidence du processus non-linéaire d'émission ciliaire créé lors de l'interaction entre le laser femtoseconde intense et un matériau solide transparent.



- Filamentation dans l'eau

En collaboration avec la DGA nous avons aussi démarré en 2012 une étude de la filamentation dans l'eau pour la génération d'ondes acoustiques. L'objet de ce projet est le développement d'études théoriques et expérimentales de la génération de sources acoustiques sous-marines déportées et flexibles pour des applications de sonar, d'imagerie ou de communication. Le projet comporte un volet expérimental réalisé par l'équipe du LOA et le LMA, et un volet théorique réalisé en parallèle par l'équipe du Centre de Physique Théorique (CPHT).

Y. Liu et al, Phys. Rev. Lett. 110, 097601 (2013)

M. Durand, et al, Phys. Rev. Lett. 110, 115003 (2013)

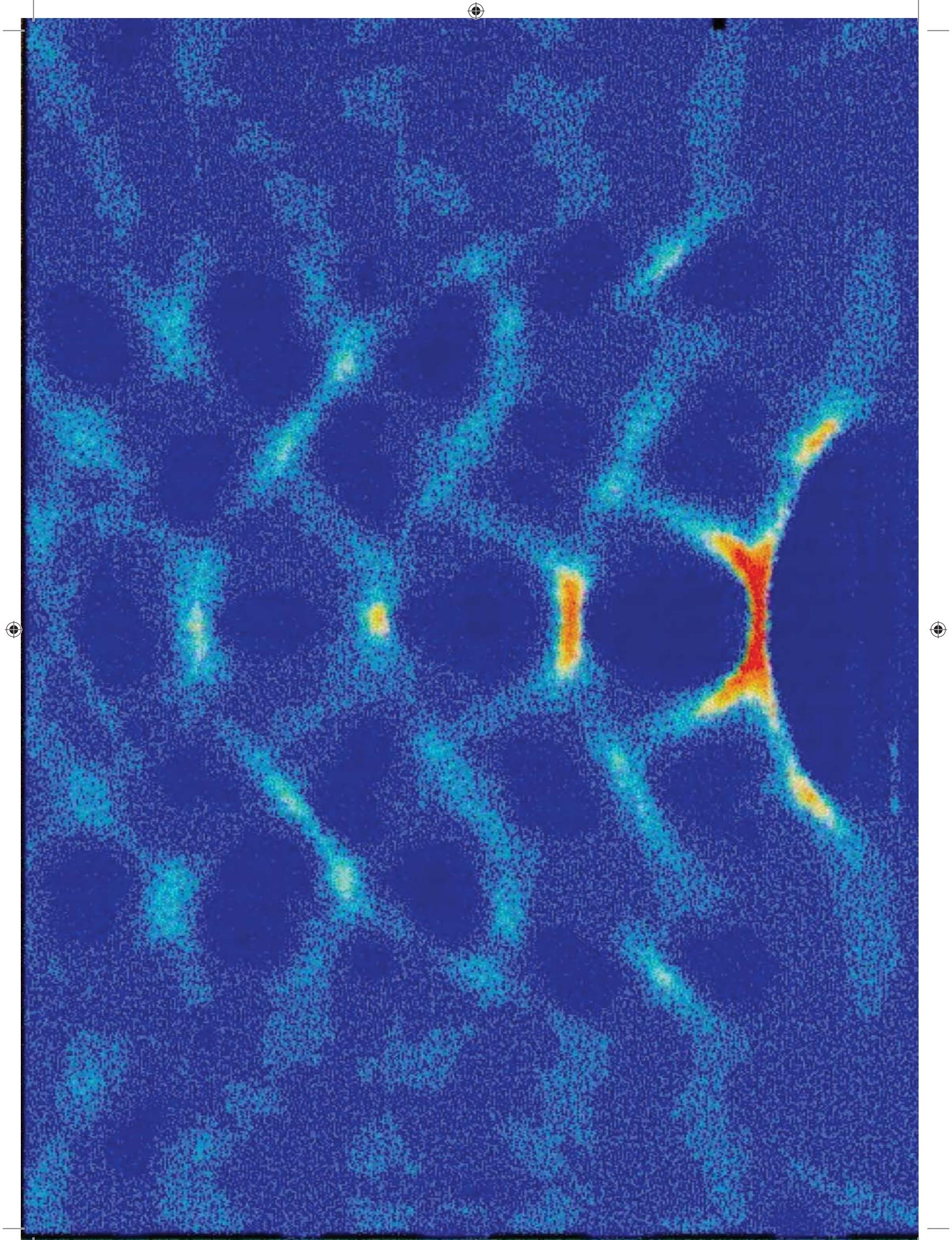
B. Zhou et al, Phys. Rev. Lett. 106, 255002 (2011)

Y. Liu et al, Phys. Rev. Lett. 105, 055003 (2010)

A. Houard et al, Phys. Rev. Lett. 100, 255006 (2008).

Par des mesures dans une petite cuve au LOA et dans le bassin acoustique du LMA à Marseille, nous avons montré qu'en focalisant le faisceau laser TW de l'ENSTAmobile à 800 nm dans l'eau, on pouvait exciter une onde acoustique très large bande (plusieurs MHz). Ce signal acoustique a une énergie non négligeable (plus de 150 dB/ ref 1 μ Pa à 1m) qui peut être contrôlée en jouant sur les paramètres du laser comme l'énergie et la durée de l'impulsion. Une mesure du diagramme de directivité de cette source acoustique a

montré qu'elle était omnidirectionnelle dans le plan horizontal XY (perpendiculaire à l'axe du faisceau laser) et très étroite dans le plan vertical XZ (quelques degrés seulement). Un modèle simple d'antenne linéique ne semble pas pouvoir expliquer la dépendance de ce diagramme avec la fréquence émise, ce qui nécessitera donc des analyses plus fines de la forme de la source produite par le laser ainsi que de son mécanisme de formation.



Avancées scientifiques - Groupe SPL

Sources de Particules par Laser

Le groupe SPL étudie la physique de l'interaction laser-plasma dans le régime relativiste, le développement d'accélérateurs laser plasma, et l'étude de leurs applications. Le travail scientifique s'articule autour de trois thématiques : l'accélération d'électrons, l'accélération de protons et les applications.

L'accélération d'électrons énergétiques

- Le premier résultat marquant est la mesure de la durée du faisceau d'électrons (1.5 fs) en utilisant le diagnostic de transition de rayonnement cohérent.

La brièveté de ces faisceaux d'électrons ouvre la voie à de nombreuses applications. La plus prometteuse est, sans doute, la possibilité de réaliser des lasers à électrons libres compacts. En effet, le courant de quelques kA produit par ce type d'accélérateur, est comparable à celui du SLAC (Stanford Lineac Accelerator) qui a permis, en couplant le faisceau d'électrons à des onduleurs, la production de la source X - LCLS (Linac Coherent Light Source) - la plus brillante au monde. Ce résultat important a été publié en 2011 dans la revue Nature Physics.

- Mise en évidence de l'effet de rétroaction du faisceau d'électron sur la structure accélératrice du plasma.

Cette étude a permis de réduire la dispersion en énergie du faisceau d'électrons. L'effet se traduit expérimentalement par la corrélation entre la charge, la dispersion en énergie et l'énergie du faisceau d'électrons. En présence d'un faisceau de faible courant le champ électrique associé au sillage du laser disperse les électrons en énergie. En présence d'un courant optimum de l'ordre de quelques kA, le champ électrique créé par le sillage laser est aplati par la force de répulsion du paquet d'électrons. Les électrons sont alors accélérés uniformément. Pour des courants plus importants, le champ électrique devient localement dispersif et les électrons les plus énergétiques à l'avant du paquet se trouvent moins accélérés que les électrons de plus faibles énergies. Cet effet a permis de produire des faisceaux d'électrons avec une dispersion relative en énergie de 1%.

- Etudes fines des mécanismes d'injection

Le diagnostic de transition de rayonnement dans le domaine visible (OTR) a permis une étude très fine de l'injection « simple » ou « multiple » dans les différentes parties accélératrices de l'onde de sillage plasma. Un spectre lisse correspond à une injection principalement localisée dans la première arche. La présence de deux paquets d'électrons ultra-brefs se traduit, de fait, dans le spectre de rayonnement de transition par la présence d'interférences. L'interfrange, donnant de plus directement la durée entre les paquets d'électrons, permet de façon simple et directe de localiser précisément les zones où les électrons sont injectés.

- Utilisation du rayonnement X bêta-tron pour caractériser les électrons accélérés.

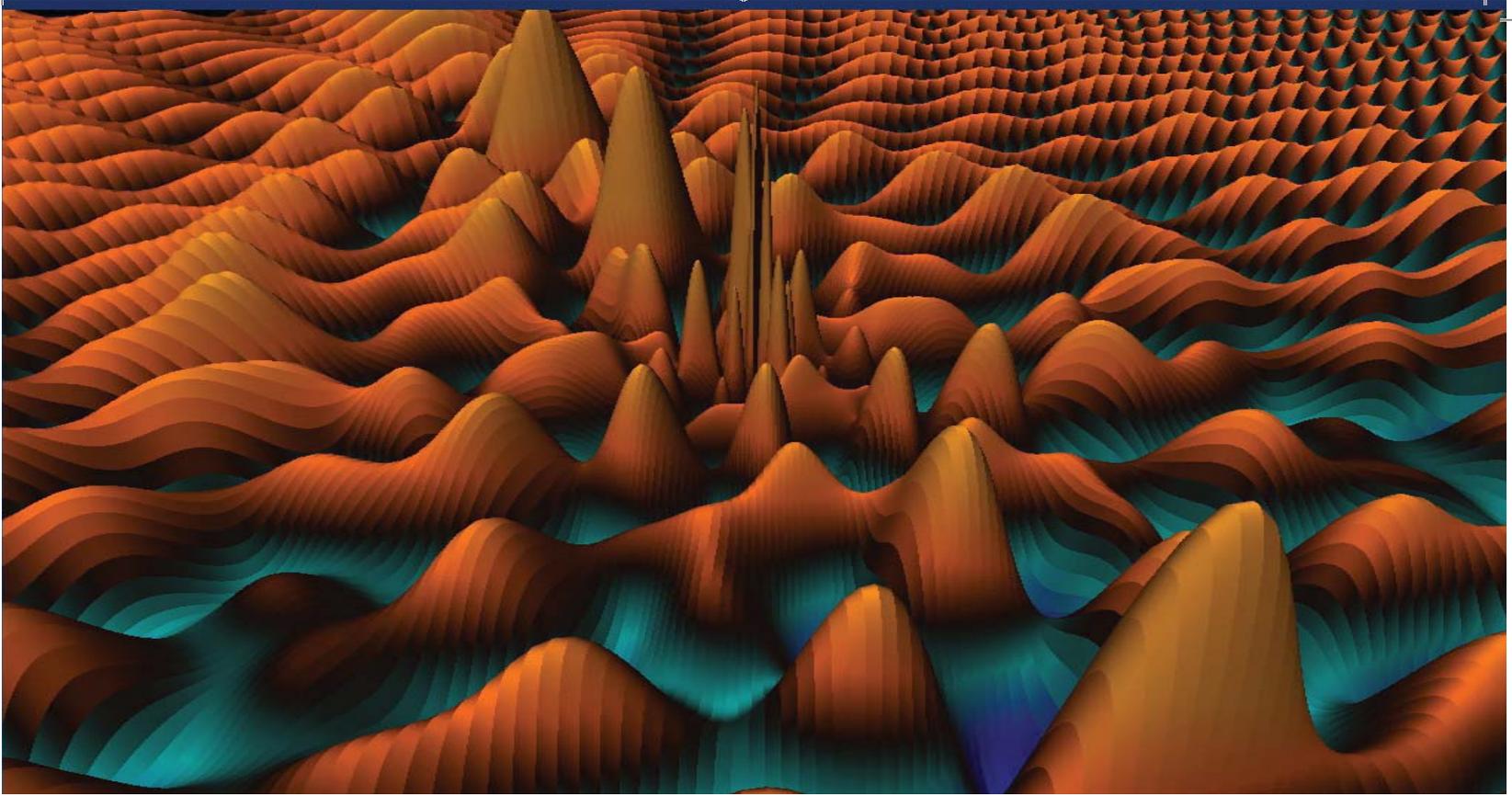
En collaboration avec le groupe FLEX, nous avons entrepris une mesure simultanée des paramètres de faisceaux d'électrons et de faisceaux X émis par le processus bêta-tron. Ce dernier, qui est produit quand les électrons oscillent dans les champs électriques transverses, permet d'obtenir de façon simple et non invasive des informations sur le faisceau d'électrons.

La mesure de la distribution spatiale de ce rayonnement à travers un orifice a révélé avec précision les zones d'injection et d'accélération. Les mesures simultanées du rayonnement bêta-tron et des spectres d'électrons en fonction de la longueur du plasma créé ont mis en évidence le mode d'injection longitudinal. L'étude du rayonnement bêta-tron, qui a également permis d'obtenir les premières images par contraste de phase avec des résolutions spatiales de

l'ordre du micron, a aussi participé à mieux comprendre les mécanismes d'injection et d'accélération. Elle a permis de montrer qu'au-delà de la longueur de déplétion de l'énergie laser, le faisceau d'électrons pouvait être accéléré par le sillage auto-créé. De plus, l'analyse de ses distributions spatiales et énergétiques a donné une évaluation de l'émittance du faisceau d'électrons. Ces travaux ont fait l'objet de nombreuses publications dans Nature Physics, PRL et Phys. of Plasma.

- Interaction faisceau d'électrons - laser intense: démonstration de la diffusion Compton

Une autre application des faisceaux d'électrons issus des accélérateurs à plasma laser concerne la production d'une source gamma énergétique par diffusion Compton. Les gamma produits, combinent pour la première fois, durée ultrabrève femtoseconde, faible divergence, haute énergie, taille de source micrométrique, et brillance élevée. En utilisant une nouvelle méthode, entièrement optique, le groupe FLEX et SPL ont ainsi réussi à produire des flashes de rayonnement gamma plus de 10 000 fois plus brillants que ceux produits par les sources conventionnelles existantes. Simple et efficace, le schéma démontré repose sur l'interaction entre un laser femtoseconde intense qui en étant rétrodiffusée par une cible mince interagit avec le faisceau d'électrons qu'elle a créé lors de sa propagation dans un jet de gaz situé en amont de la cible mince. La caractérisation de ce flash de rayonnement a permis de mettre en évidence son spectre, qui s'étend du domaine X à celui du rayonnement gamma,



Diffraction d'un électron par un ion écranté dans un métal.

sa taille de source qui est micrométrique, et sa divergence qui est de l'ordre du degré. Cette première démonstration expérimentale ouvre des perspectives pour le développement d'une nouvelle génération de sources de rayonnement énergétique.

Ce résultat, autre exemple de la collaboration féconde entre le groupe FLEX et SPL, est publié dans la revue *Nature Photonics* du mois de mai 2012. De telles sources, implantées dans des laboratoires de taille universitaire, ou dans des environnements industriels, seraient des outils puissants pour de nombreuses applications liées à l'étude de phénomènes ultra-rapides.

L'accélération de protons

L'accélération efficace de protons par laser est issue dans beaucoup de cas de l'interaction d'une impulsion laser avec une cible surcritique, typiquement une feuille mince métallique. Les récents développements du laser de la Salle Noire ont permis,

en collaboration avec le groupe PCO, de produire des protons énergétiques à quelques dizaines de keV par irradiation laser de cibles solides. Ces résultats ont été obtenus avec un laser kHz délivrant seulement 1 mJ sur cible. Ils ont permis de mettre en évidence un nouveau régime d'accélération dominé par le chauffage Brunel des électrons soumis au champ intense du laser.

Les cibles gazeuses ultra-denses que nous développons sont innovantes pour l'étude de la physique de l'interaction en régime relativiste avec des plasmas de densité proche ou supérieure à la densité critique. Ces développements ainsi que la mise en place de diagnostics optiques spécifiques nous ont permis d'ouvrir une brèche dans ce domaine d'interaction encore inexploré. Les premiers résultats sont tout-à-fait intéressants car ils mettent en évidence une accélération ionique transverse efficace qui révèle de nouveaux mécanismes d'accélération ionique, la formation de structure de type « vortex » et de solitons dont la dynamique a été mesu-

rée de façon fine, et enfin la création de filaments et de bulles de plasma.

L'accélération ionique radiale en milieu sous dense a fait l'objet d'une campagne expérimentale en salle jaune. Pour la première fois des spectres ioniques de distribution en énergie non maxwellienne ont été mesurés avec des énergies de coupure de l'ordre de 150-200 keV. Les simulations numériques menées au LOA et au CEA ont permis de révéler un régime d'accélération autre que l'explosion coulombienne. Ce régime fait intervenir la dynamique de formation d'un canal ionique, suivie de la formation d'un filament central qui apparaît plus tard après disparition du sillage laser, et d'un effet de gaine transverse qui agit sur des distances plus grandes que les dimensions radiales du faisceau laser. Ces effets combinés expliquent à la fois les énergies et la forme quasi-mono-énergétique des distributions ioniques mesurées.

En marge de ces travaux d'études de physique de l'interaction, nous avons progressé dans le développement de nouvelles cibles : cellules gazeuses à longueurs variables et jets de gaz hautes pressions. Les cellules de gaz à longueurs variables ont été testées avec succès lors de la dernière campagne expérimentale de la Salle Jaune. Les résultats déjà très prometteurs sont en cours d'analyse. Ces développements ont fait l'objet d'un brevet.

Les applications

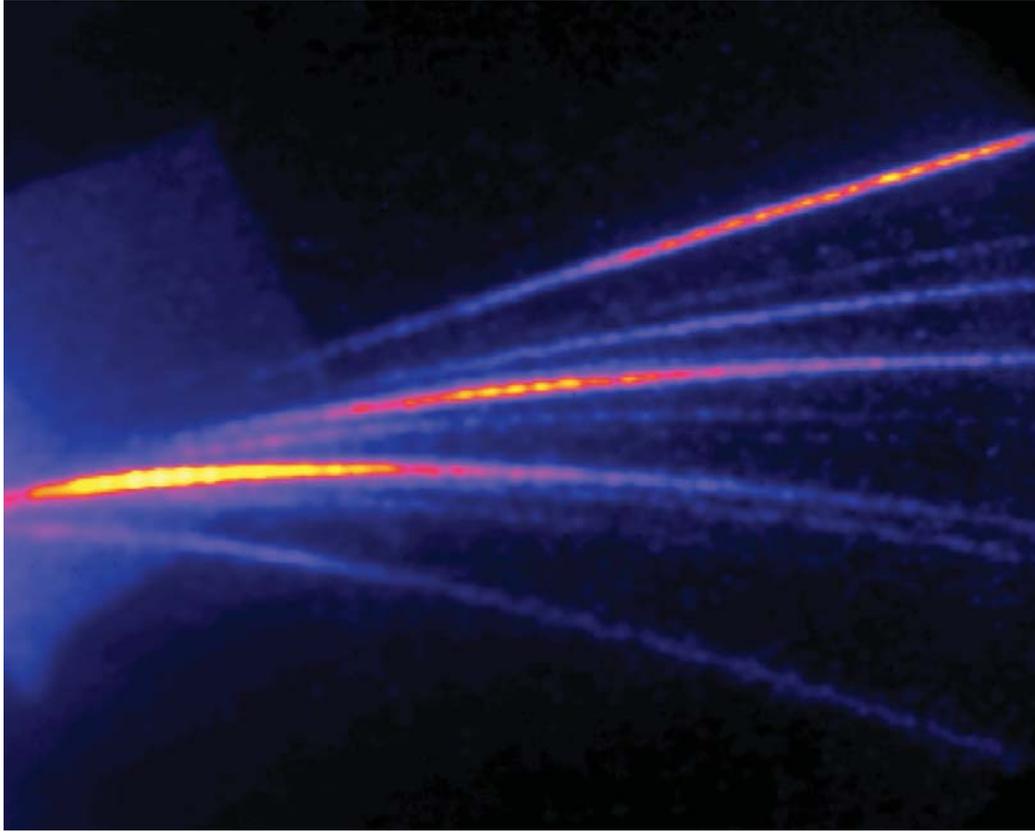
- faisceaux ultra brefs au service de la radiolyse.

Le groupe SPL développe plusieurs applications des accélérateurs laser plasma pour démontrer et valoriser le potentiel de ces sources. Elles concernent des domaines allant de la physique du solide, à la médecine en passant par la chimie et la radiobiologie.

Afin de comprendre les processus primaires intervenant lors de la radiolyse, une première expérience d'application du faisceau d'électrons à la physico-chimie a été effectuée avec succès en collaboration avec le groupe FCB. Les résultats montrent pour la première fois que ces processus de transfert de charges se produisent sur des temps subpicosecondes. En sondant une solution aqueuse perpendiculairement au faisceau d'électrons avec le faisceau laser sonde, les mécanismes de réhydratation et les mécanismes de relaxation non radiatifs ont été mis en évidence.

- faisceaux de petites tailles transverses au service de la science des matériaux.

En bombardant une cible dense par le faisceau d'électrons, une partie de l'énergie des électrons est convertie en rayonnement γ . La source étant petite, la radiographie d'objets denses pourrait révéler des structures submillimétriques. Une telle résolution ne peut être atteinte par les techniques existantes de façon simple. En collaboration avec le CEA/DAM nous avons montré en 2005 la possibilité de radiographier des objets denses avec une résolution déjà record de 400 microns. En 2009 nous avons réalisé (contrat DGA) une étude d'optimisation qui a permis d'améliorer notre source avec cette fois une résolution inférieure à 50 microns.



Spectroscopie d'ions énergétiques générés sur cible solide.

- faisceaux énergétiques au service de la radiothérapie.

Nous avons montré à l'aide simulations que les faisceaux d'électrons produits dans le régime de la bulle ou de collision d'impulsions lasers étaient tout à fait adaptés à la radiothérapie. Nous avons mesuré en 2011, le dépôt de dose de ces électrons dans des fantômes. Les calculs réalisés en collaboration avec le DKFZ en Allemagne ont de plus montré qu'une amélioration de 19% de la qualité du traitement dans le cas d'un cancer de la prostate pourrait être réalisée par rapport au traitement réalisé avec des photons X (IMRT).

- faisceaux à haut débit de dose au service de la radiobiologie.

Avant d'entrevoir la possibilité d'utiliser les

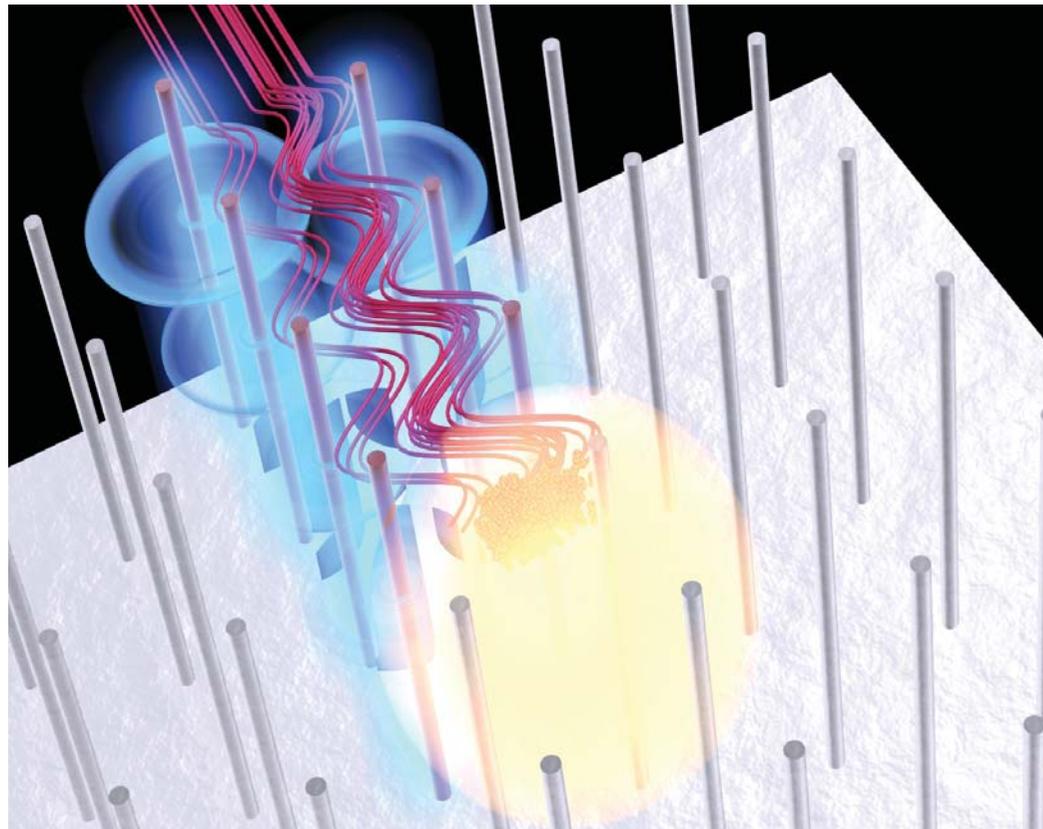
faisceaux d'électrons pour la radiothérapie, il convient d'étudier la réponse du milieu cellulaire soumis à ce type de rayonnement ionisant. Le fait de délivrer des débits de doses gigantesques, de l'ordre de 10^{13} Gy/s, a interpellé la communauté médicale. Afin de répondre à ces interrogations, nous avons mené, en collaboration avec le groupe FCB et le Laboratoire de Génomique et Radiobiologie de la Kératinopoïese du CEA, des travaux visant à étudier le taux de survie et la réparabilité de cellules cancéreuses de carcinomes humaines, particulièrement radio-résistantes. Les résultats marquants que nous avons obtenus montrent qu'il n'y a pas d'effets « collectifs » ou de « champs » et que la mortalité est identique à celle de cellules identiques irradiées par du rayonnement X continu. Le fait de délivrer des doses létales sur des temps courts permet d'autre part d'entrevoir un nouvel axe de recherche

concernant la « réparabilité » des cellules humaines et ouvre la voie à des études d'optimisation des protocoles de dépôt de dose - fractionnabilité. Ces travaux qui ont fait l'objet de nombreuses publications dont une correspondance publiée dans Cell Death and Disease fin 2010 ont permis de lancer un nouveau projet « Nanobiodos » qui vient d'être accepté pour financement.

L'apport des contrats obtenus par le groupe SPL a été déterminant pour mener à bien nos thèmes de recherche dans le contexte très compétitif de cette science au niveau international. Le groupe joue de plus un rôle charnière tant dans l'animation, dans la coordination que dans la mise en place de nombreux contrats nationaux et internationaux. Parmi les plus importants, au niveau national

le projet OSEO SAPHIR sur l'étude de la faisabilité de l'accélération de protons par laser pour la proton-thérapie (avec comme partenaire: l'Institut Gustave Roussy, l'Institut Curie, le CEA DAM, IRAMIS, Amplitude Technology, Dosisoft et Imagine Optique), le projet du plan cancer Nanobiodos (avec le LCP, le CIMAP et l'IPN), l'ANR GOSPEL (avec le CEA DAM et IRAMIS), le projet IDEX CILEX (avec de nombreux partenaires du CNRS, du CEA et de l'Université de Paris XI...). Au niveau international, des collaborations avec l'INFIN de Roumanie, le CLPU d'Espagne ou encore APRI de Corée. La première a donné lieu au projet ANR ILA franco-roumain et les secondes à des accords de collaboration (M.O.U.). Le groupe SPL est aussi présent et très actif dans les grands projets LASERLAB et EUCARD au sein desquels il coordonne des JRA, "joint Research Activities". Deux mem-

Rayonnement X laser à électrons libres généré par l'oscillation d'électrons énergétiques, produits par interaction laser-plasma, dans des onduleurs nanostructurés.



bres du groupe ont obtenu des bourses ERC: une Sénior, une Junior et une « proof of concept ». La visibilité et la notoriété du groupe au sein de la communauté, qu'elle soit « laser », « plasma » ou « accélérateur » sont maintenant établies. Les membres du groupe interviennent fréquemment auprès des médias et assurent une diffusion de bonne qualité de la culture scientifique. Ils sont régulièrement invités dans des conférences internationales et assurent une productivité scientifique record tant par sa qualité que par sa quantité. Ils sont aussi justement régulièrement primés.

S. Corde et al, Nature Communications, 4, 1501 (2013).

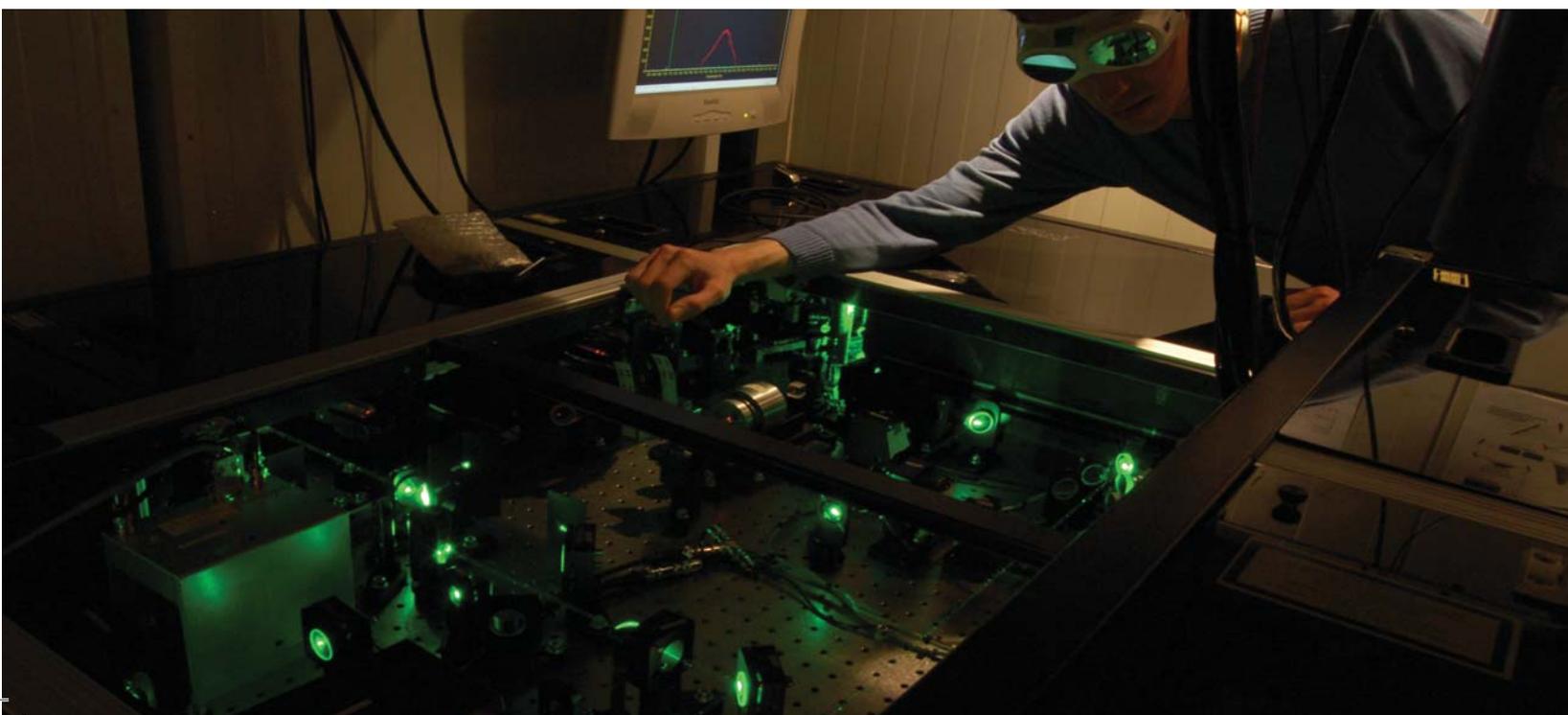
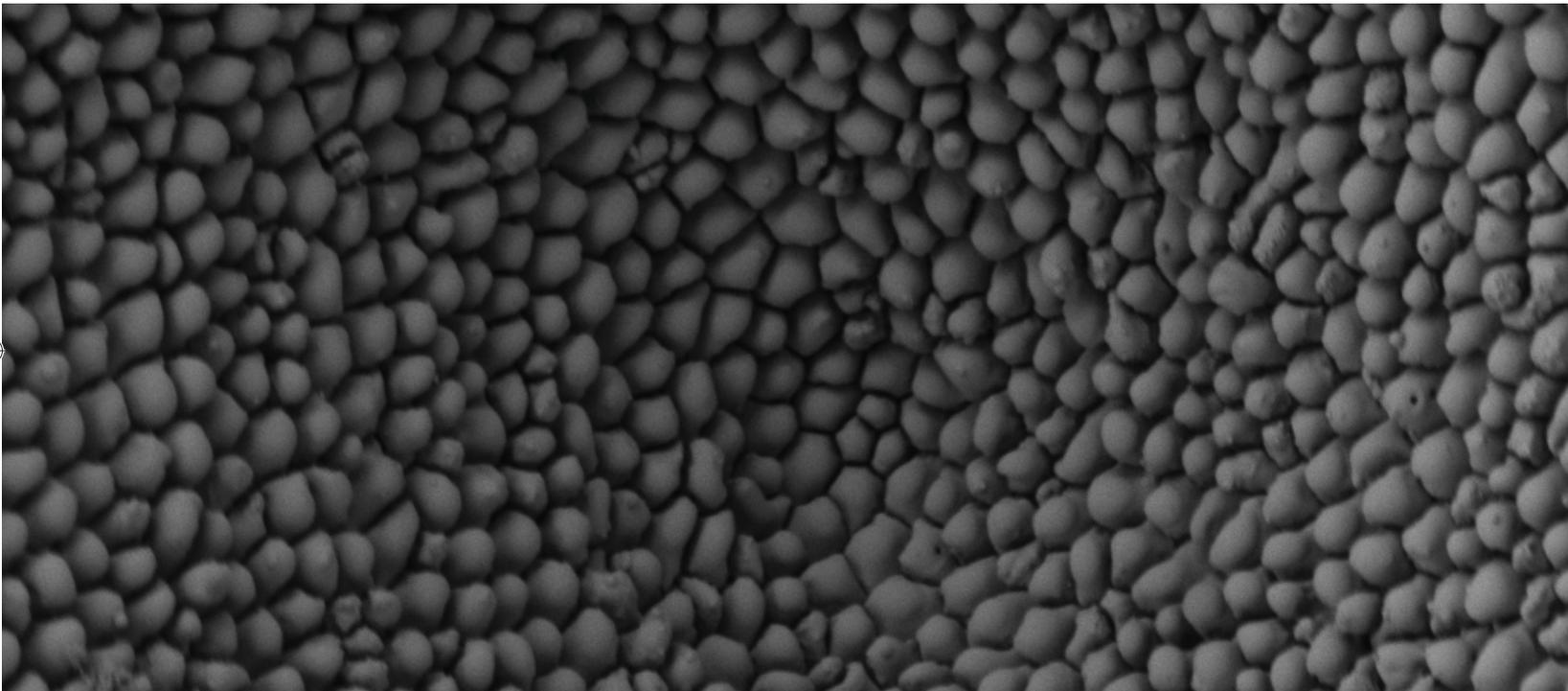
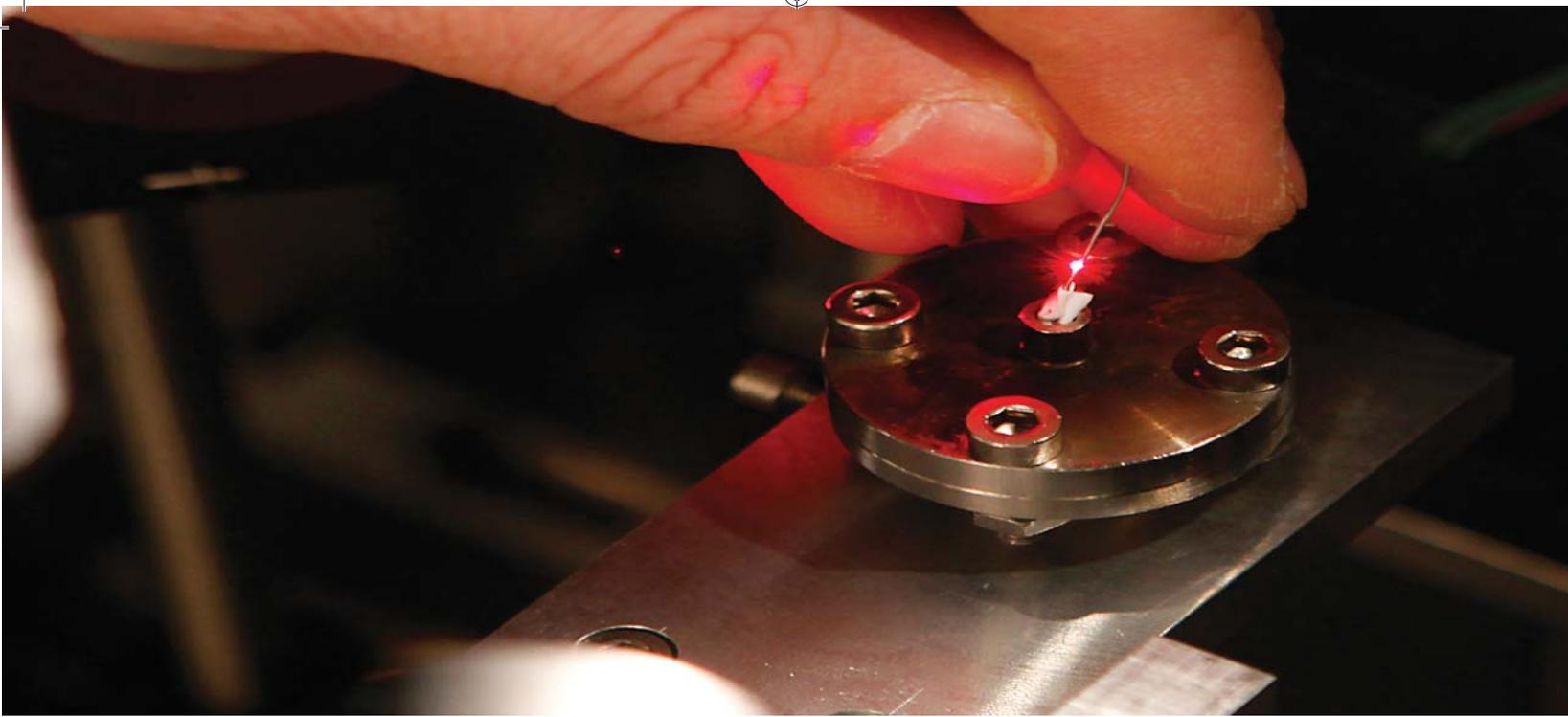
O. Lundh et al, Phys. Rev. Lett. 065005, 110 (2013)

K. Ta Phuoc et al, Nature Photonics 6, 308-311 (2012).

M. Veltcheva et al, Phys. Rev. Lett. 108, 075004 (2012)

V. Malka et al, Nature Physics 4 (2008)

Enfin la démarche applicative du groupe a permis, en plus du projet OSEP SAPHIR déjà mentionné, l'obtention de la bourse ERC Proof of Concept. Le financement correspondant a permis d'une part de montrer la pertinence de la création d'une start-up sur la radiographie gamma et d'autre part de mettre en place tous les éléments nécessaires au bon démarrage de cette société. SourceLab, la toute récente spin-off du LOA a reçu trois prix.



Avancées scientifiques - Groupe FCB

Femto-Chimie Bioradicalaire

Le Groupe FCB associe des approches fondamentales de chimie physique sur des états radicalaires quantiques dans le régime pré-thermique à une vision appliquée pour les sciences biomédicales (altérations moléculaires en cardiologie, oncologie et radiothérapie) à partir de l'utilisation de lasers ultra-brefs et de techniques spectroscopiques à très hautes résolutions temporelles. Au cours de la période 2008-2013, le groupe FemtoChimie Bioradicalaire a amplifié, à travers une collaboration forte avec le groupe SPL, le développement de la femtochimie radicalaire des hautes énergies (FRHE) dans le domaine du MeV. FCB a focalisé ses activités de recherche sur: i. les aspects fondamentaux d'effets primaires induits par des paquets femtosecondes d'électrons relativistes accélérés par laser; ii. la mise en place de nouveaux concepts relatifs à la biomédecine des radiations. Ces recherches interdisciplinaires ont donné lieu à des collaborations avec des équipes du CNRS, du CEA, du GANIL et de l'IPN Lyon ainsi qu'à des groupes de travail avec AVIESAN et l'INSERM (ITMO Technologies pour la santé et ITMO Cancer).

La femtochimie bioradicalaire des hautes énergies (FRHE) s'impose comme une véritable science de transfert entre les techniques avancées relatives aux sources pulsées ultra-brèves induites par interactions laser TW-plasma et certains champs d'applications tels que la physique médicale et la biologie spatio-temporelle des radiations. Ces deux domaines sont étroitement impliqués dans tous les développements novateurs qui touchent aux différentes thérapies des cancers par irradiation externe (radiothérapies conformationnelles ou par modulation d'intensité) menées seules ou en association avec des protocoles de thérapies chimiques (radio-chimiothérapies et radio-immunothérapies).

Le rayonnement ionisant pulsé obtenu à partir de nouvelles sources laser-plasma délivrant des paquets ultra-brefs d'électrons accélérés dans le domaine du MeV permet d'atteindre des très hauts débits de dose, de l'ordre de 10^{14} Gy s^{-1} . Les applications potentielles en médecine de telles sources nécessitent de mettre en place des démarches interrogatives à partir desquelles de nombreux aspects fondamentaux doivent être abordés et mis en perspective par rapport aux contraintes médicales. Les conséquences médicales envisagées ou supposées pour les radiothérapies pulsées de certains cancers doivent être étayées par une plus grande connaissance des phénomènes physicochimiques précoces et complexes intervenant dans les grappes d'ionisation. Une telle connaissance des phénomènes primaires radio-

Structure d'ablation d'un solide transparent par laser femtoseconde intense.

radio-induits nécessite une approche 3D impliquant le temps, l'espace et l'énergie ; cette approche est d'autant plus cruciale que les cibles potentiellement concernées pour de futures applications biomédicales (cellules, tissus sains ou cancéreux) relèvent de la matière vivante donc de la biologie des systèmes intégrés complexes. Les recherches développées par FCB ont pour objectif une meilleure compréhension: i. des processus d'altérations précoces d'architectures moléculaires constitutives d'une cellule (matériel génétique, systèmes enzymatiques, entités membranaires ou cytoplasmiques...); ii. de la radiosensibilité d'un tissu sain ou cancéreux soumis à un examen exploratoire en présence d'un rayonnement de faible intensité souvent répétitif et pulsé (faibles doses en radiodiagnostic) ou soumis à des conditions d'irradiations pulsées thérapeutiques.

Les actions pionnières de FCB en recherche fondamentale sur la FRHE ainsi que les efforts entrepris pour favoriser les transferts ou la valorisation vers le monde médical ont été amplifiées par le développement du Réseau Biologie des radiations MELUSYN. Ce réseau transdisciplinaire dont FCB est à l'origine réunit une centaine de scientifiques et médecins hospitaliers spécialisés dans approches thérapeutiques anticancéreuses.

Afin d'optimiser certains protocoles de traitement des cancers par des faisceaux d'ions (hadronthérapie) ou de particules relativistes (protons, électrons), une nouvelle action européenne COST MP 1002 intitulée Nanoscale Insights in Ion Beam Cancer Therapy (Nano-IBCT) a été mise en place pour

la période 2011-2014. Le groupe FCB est l'un des deux représentants pour la France au comité de management de cette action COST "Nano IBCT".

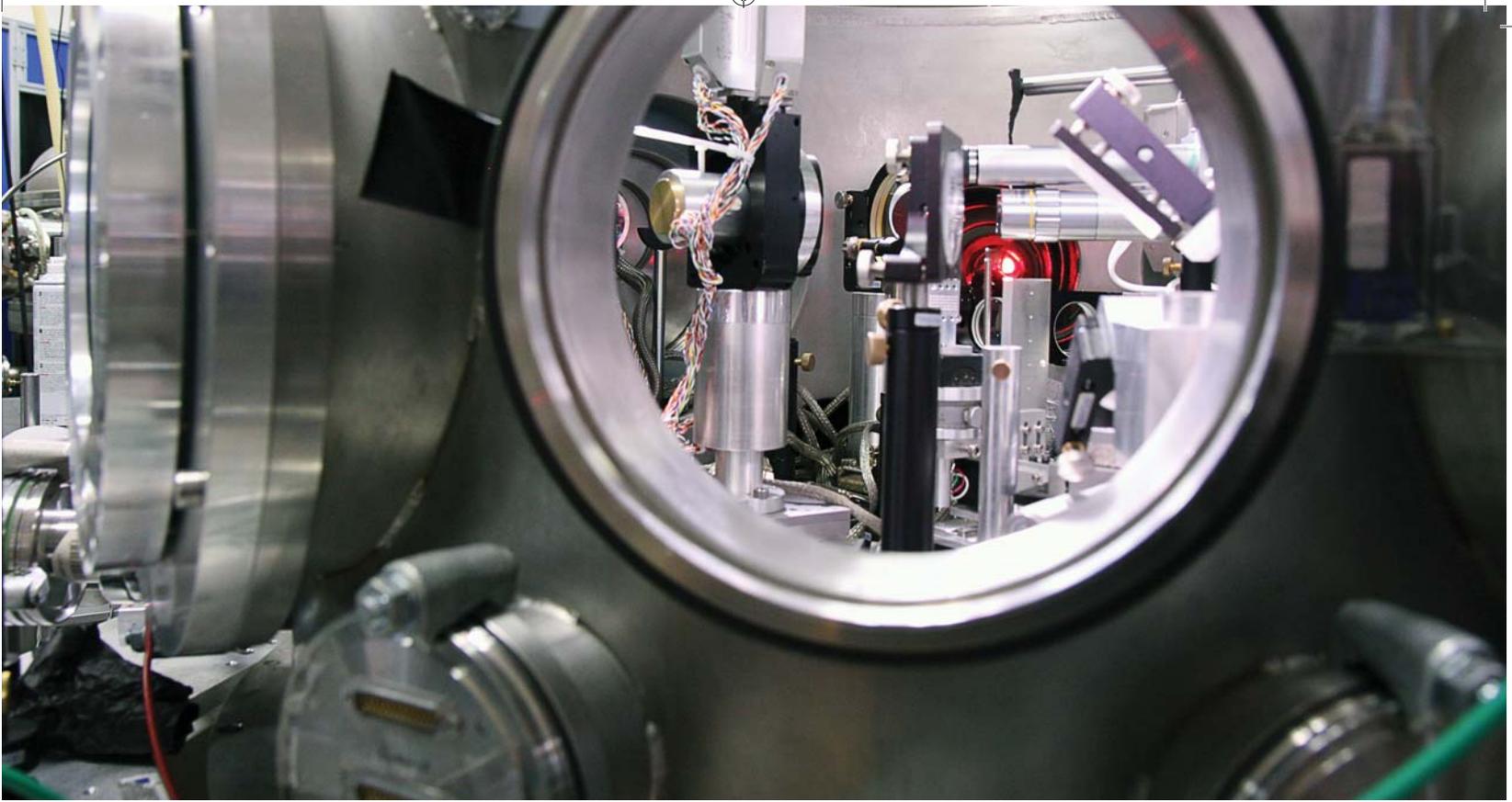
- Projet FEMTOLYSIS (Femtosecond radiolysis)

Les recherches FRHE menées avec des faisceaux pulsés ultra-brefs de particules relativistes (électrons dans le domaine d'énergie 5-15 MeV), dont la largeur temporelle à mi-hauteur est de l'ordre de 10^{-13} s, ont ouvert la voie à l'étude en temps réel des premiers dommages moléculaires induits par l'irradiation. Dans ce cadre, le projet FEMTOLYSIS dédié à l'étude des processus fondamentaux induits par des paquets femtoseconde d'électrons de haute énergie a été axé sur les milieux d'intérêt biologique.

Les données expérimentales FEMTOLYSIS montrent l'existence d'un rendement primaire bien supérieur aux prédictions obtenues par simulations de type Monte Carlo. Ces résultats arguent pour une prise en considération, dans les grappes d'ionisation à haute densité, de paires dépendantes électron-trou ou électron-radical caractérisées par de très courtes durées de vie ($t < 300$ fs).

- Projet FEMTOBIORAD

L'un des objectifs du projet FEMTOBIORAD (Femto Biologie des Radiations) est d'expertiser les capacités des paquets d'électrons relativistes ultra-courts à délivrer des très hauts débits de dose ($\sim 10^{14}$ Gy s^{-1}) sur des populations cellulaires vivantes, non synchronisées. Les premiers résultats montrent que des altérations réversibles de



dépôt d'énergie unique de 1Gy intervenant en moins de 100 fs ou lors de dépôts femtosecondes multiples.

- Du scalpel quantique à la biomédecine des radiations ultra-brèves, Projet NANOBIDOS

Dans le cadre du 2^{ème} plan cancer et de l'AAP Physique-Mathématiques-Cancer, le projet NANOBIDOS a été sélectionné en 2012 par AVIESAN (ITMO Cancer et ITMO Technologies pour la santé) et l'Institut National du Cancer (INCa).

L'un des objectifs majeurs du projet NANOBIDOS est d'identifier et analyser en temps réel un état quantique induit par un paquet femtoseconde d'électrons relativistes, i.e. un état très transitoire d'un électron secondaire partiellement relaxé et ayant une configuration de type "p". Les signaux qui doivent être détectés à travers une configuration pompe sonde dans l'infrarouge correspondent à des transitions électroniques

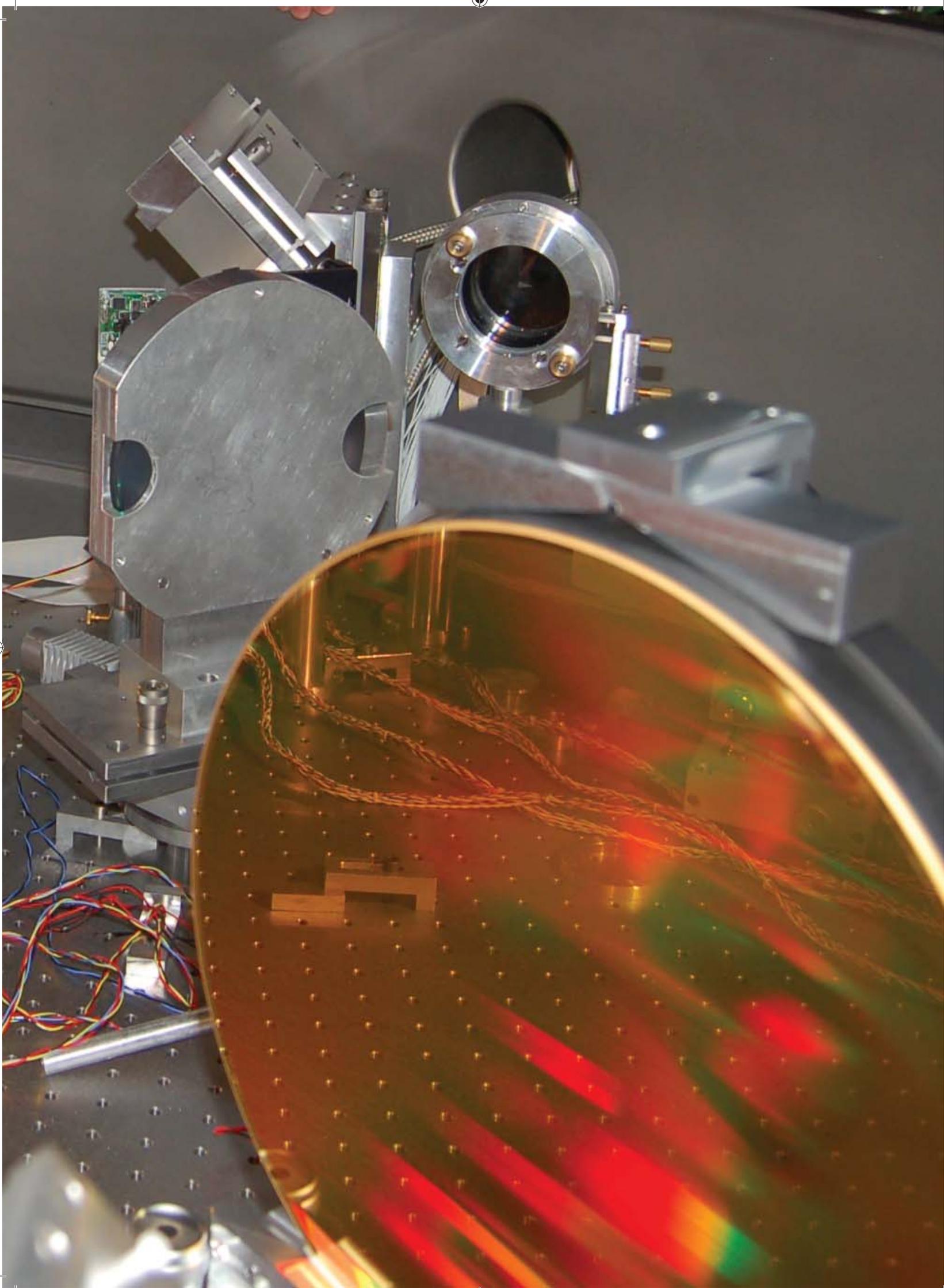
dont le gap entre les distributions d'états est de l'ordre de 0.6 – 0.9 eV. Nous développons actuellement la ligne de spectroscopie infrarouge à haute résolution temporelle pour l'identification d'états quantiques dans les grappes d'ionisation induites par les paquets femtosecondes d'électrons relativistes.

Y. Gauduel et al, Journal of Physics, CS 101, 012004 (2008)

Y. Gauduel et al, European Physical Journal D, 60, 121-135 (2010)

O. Rigaud et al, Cell Death & Disease, 1, e73 (2010)

Y. Gauduel et al, Journal of Physics CS, 373, 012012 (2012)



Avancées scientifiques - Groupe LHP

Lasers Hautes Puissances

Le groupe LHP travaille sur le développement des lasers femtosecondes intenses que ce soit vers la très haute puissance crête (Grand Instrument Apollon 10P en construction sur le Plateau de Saclay) ou vers la haute puissance moyenne (lasers pompés par diode).

Le groupe a pris part à la mise en place du système laser intense LUIRE ainsi qu'à la partie amplification de puissance du laser Apollon-10P. Concernant le développement de systèmes, le groupe a débuté en 2010 des activités sur les céramiques lasers pompées par diode.

Sur le système LUIRE, l'équipe a construit dans un premier temps la partie pilote. La partie amplification de puissance a été ensuite installée jusqu'à l'obtention d'une énergie de 3,5 joules à une cadence de 0,1 Hz et un spectre compatible avec une durée inférieure à 30 fs.

Sur Apollon-10P, nous sommes responsables de la section amplification de puissance, à savoir l'augmentation de l'énergie depuis 30 mJ jusqu'à 300 joules et ce à un tir par minute tout en gardant un spectre suffisamment important pour obtenir 15 fs en fin de chaîne. Cette thématique représente une part importante des activités de l'équipe. Entre autres, nous avons en charge l'approvisionnement du laser de pompage pour ces amplificateurs. Celui-ci représente un élément important du projet. De nombreuses études ont été nécessaires car les caractéristiques requises de ce type de laser n'étaient pas disponible commercialement. Nous avons mis en place une procédure de type dialogue compétitif qui s'est étalée sur deux années et qui comprenait une phase « démonstrateur numérique » et une phase prototypage des parties à risque.

A l'issue de ces deux phases, nous avons pu choisir le titulaire du marché. Depuis, le marché fait l'objet de visites régulières. La livraison est prévue pour le premier trimestre 2014. Dans ce programme nous menons aussi plusieurs autres études qui visent à :

- Eviter l'effet laser transverse qui se produit dans les milieux amplificateurs à forte énergie. Cet effet est totalement néfaste pour l'efficacité d'amplification et pour le profil spatial du faisceau.
- Mise au point de filtres spectraux pour conserver le spectre tout au long des différents amplificateurs.
- Obtention, par le biais de collaboration avec des académiques ou des industriels, de miroirs

compatibles avec les besoins d'Apollon-10P.

- La définition du schéma optique de l'ensemble de la section amplificatrice.

- Les travaux menés sur les céramiques laser de type Yb :Yag, pompées par diode visent à l'obtention d'impulsion dont l'énergie est de quelques dizaines de μ joules à des cadences de quelques MHz. Pour obtenir ces performances, il est nécessaire de trouver des solutions aux effets thermiques dus à la forte puissance moyenne de pompage, qui est de plusieurs centaines de watts. C'est sur cela que nous avons dans un premier temps concentré nos efforts. Nous avons pris le parti d'étudier une solution différente de ce qui est déjà utilisé par d'autres laboratoires. Notre solution de refroidissement consiste en une circulation d'eau directement en contact avec les deux cotés actifs, c'est-à-dire par lesquelles passe le faisceau. Le démarrage a été compliqué mais les premiers résultats montrent des perspectives intéressantes.

Concernant le développement de composants ou de sous-ensembles visant à améliorer les performances des systèmes, nous avons étudié ou sommes en cours d'étude sur les thèmes suivants :

- L'augmentation du contraste via la technique XPW pour les impulsions ultra-courtes ou bien l'implantation de cette technique dans un système intense (LUIRE).

- Le développement d'un étireur en volume basé sur l'enregistrement d'un réseau de Bragg dans le cadre d'une thèse Cifre avec Thales research and Technology.

- Le développement de techniques d'amplification permettant d'obtenir des impulsions de fortes énergies tout en main-

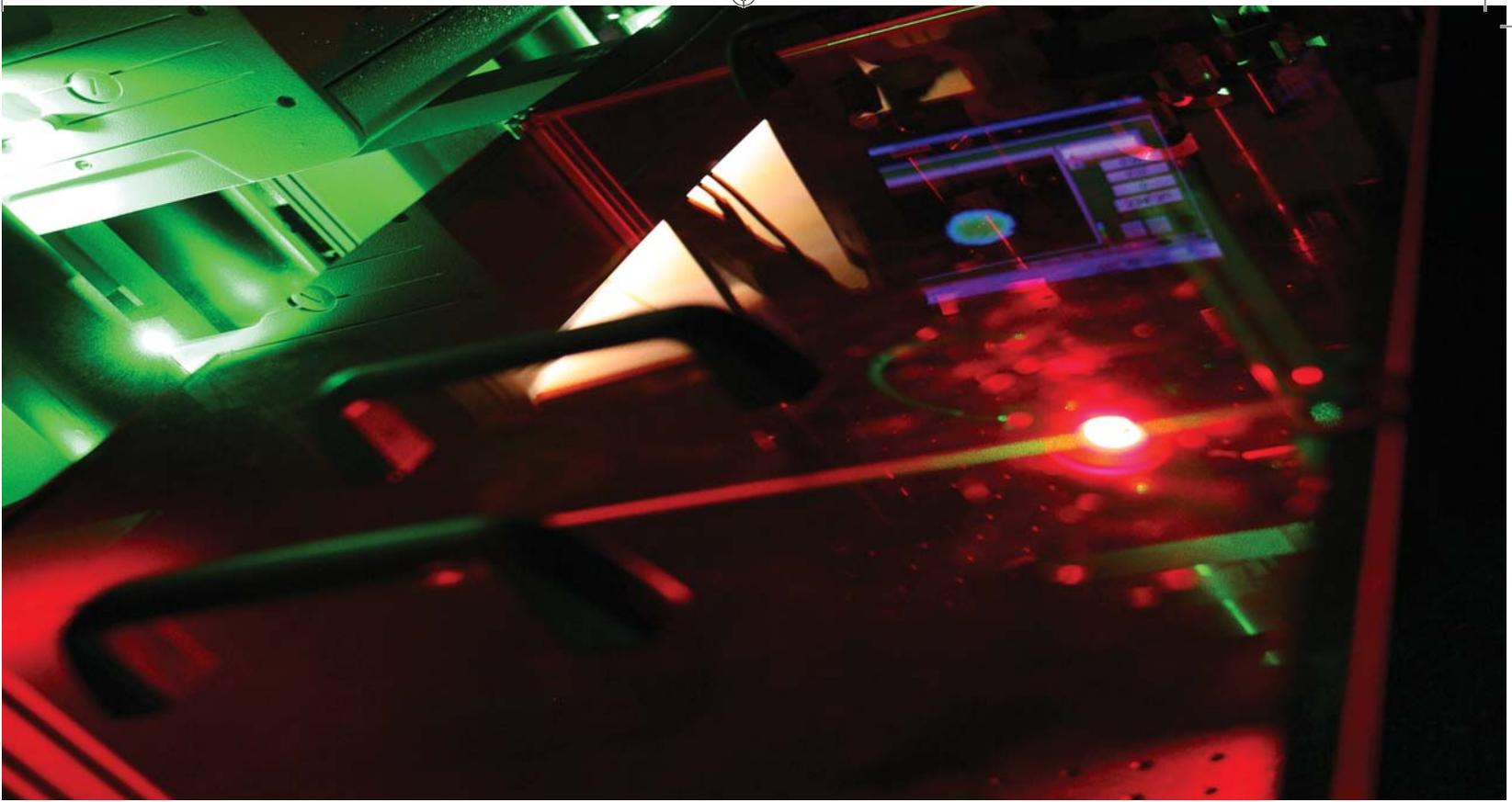
tenant une durée très courte. Une partie de ces développements a été utilisée pour le système Apollon-10P. Ces travaux ont été menés dans le cadre d'une thèse Cifre avec Thales Optronique.

- La réalisation de miroirs de grande dimension (un mètre de diamètre) à haute tenue au flux pour le transport d'impulsions de 15 fs. Ces travaux sont menés dans le cadre d'une thèse Cifre avec la société REOSC et en collaboration avec l'Institut Fresnel de Marseille.

- Avec l'ONERA, dans le cadre d'un financement ANR-ASTRID qui va débuter sous-peu (le LOA en est le coordinateur), nous allons mener des travaux sur l'optique adaptative multi-conjuguée et sur la mesure de la phase spatiale au point focal. Nous collaborons depuis 3 années déjà pour l'analyse des résultats donnés par l'optique adaptative simple et conclure sur ses limitations.

- Dans le cadre d'un financement DGA, nous avons mené une étude avec le laboratoire LP3 de Marseille sur une alternative au pompage optique du titane saphir par des lasers doublés de type Nd :YAG. Cette étude visait à réaliser une lampe verte basée sur l'utilisation de gaz de type Excimère dont l'excitation était réalisée par un circuit novateur permettant une durée d'impulsion compatible avec le pompage du TiSa. Ces développements ont donné lieu à publications, présentations dans les conférences nationales ou internationales et aux dépôts de six brevets. Deux brevets intéressent plus particulièrement Thales et Amplitude et un autre intéresse la société Imagin Optic.

Le groupe a ou a eu aussi d'autres collaborations sur le plan international :



- Nous avons participé à un PICS avec la Russie dont les représentants Français pour le CNRS étaient le laboratoire LP3 et le LOA, et les représentants Russes étaient l'Institut Lebedev et l'université d'état de Moscou. Dans ce cadre, une étude sur le raccourcissement de la durée d'impulsion en fin de chaîne (après compression) a été menée. Le principe reposait sur la génération d'effets non-linéaires en sortie de laser et avait comme cible les lasers de forte énergie présentant un faisceau de type « Top-hat ». Nous avons démontré une réduction d'un facteur trois de la durée d'impulsion. Ces travaux se sont aussi faits en collaboration avec le CUOS de l'université du Michigan où se sont passées les expériences à haute énergie.

- L'Institut de Physique de Prague et plus précisément avec le programme HiLase dont le but est de mettre en place un centre d'application des sources laser de durée courtes et présentant des puissances moyennes très importantes. Nous collaborons avec eux sur la mesure d'endommagement

de composants optiques de type miroirs et qui pour leurs différentes sources doivent présenter des caractéristiques bien spécifiques. Dans ce cadre nous mettons en place une station de mesure d'endommagement qui sera ensuite transférée à Prague.

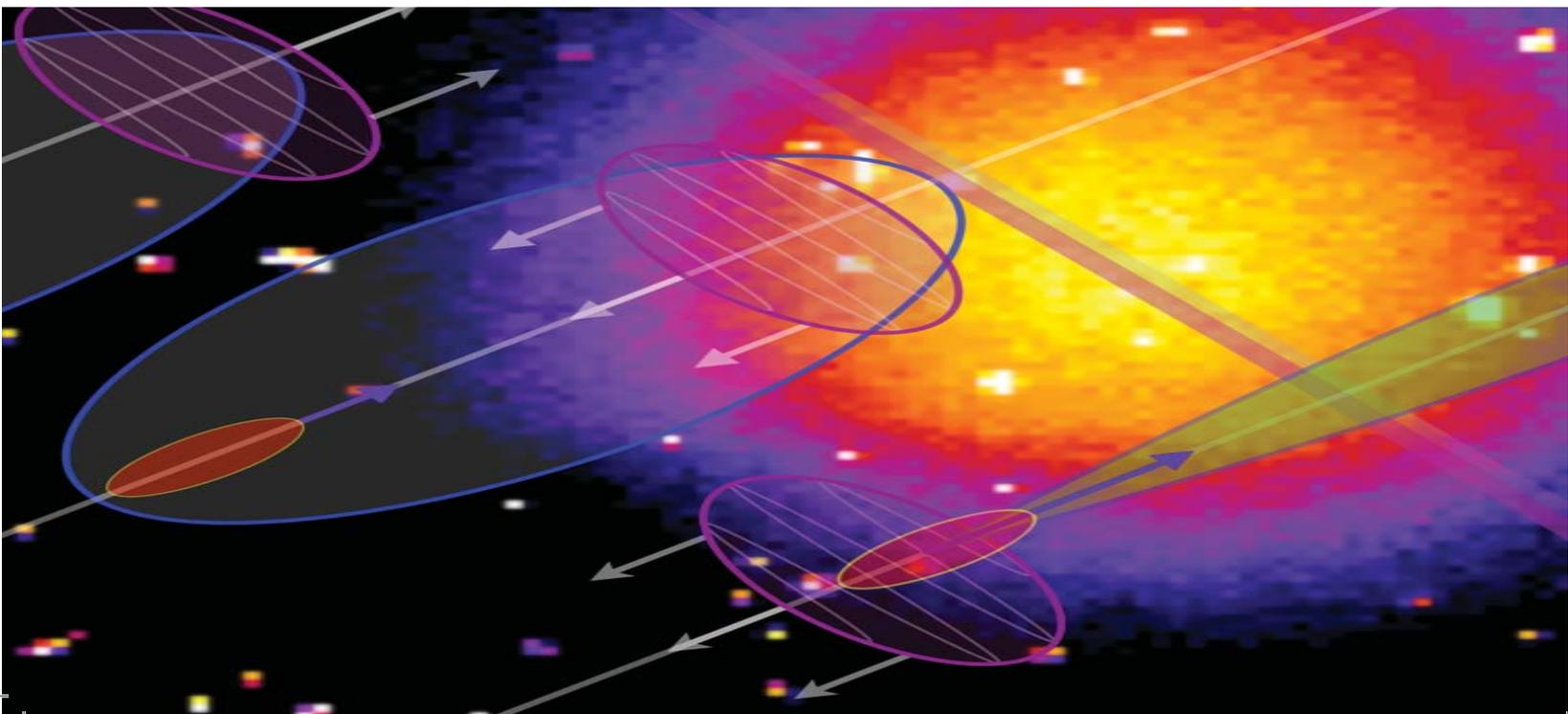
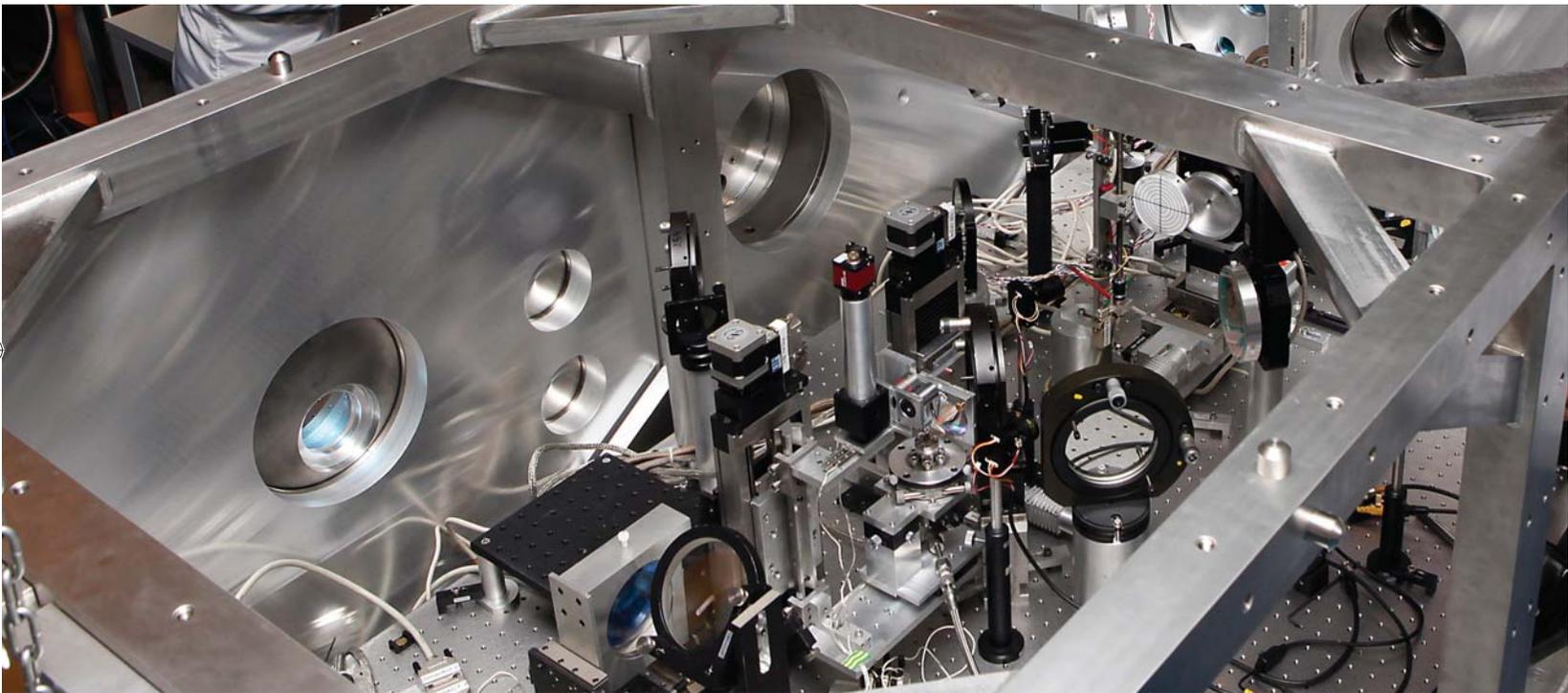
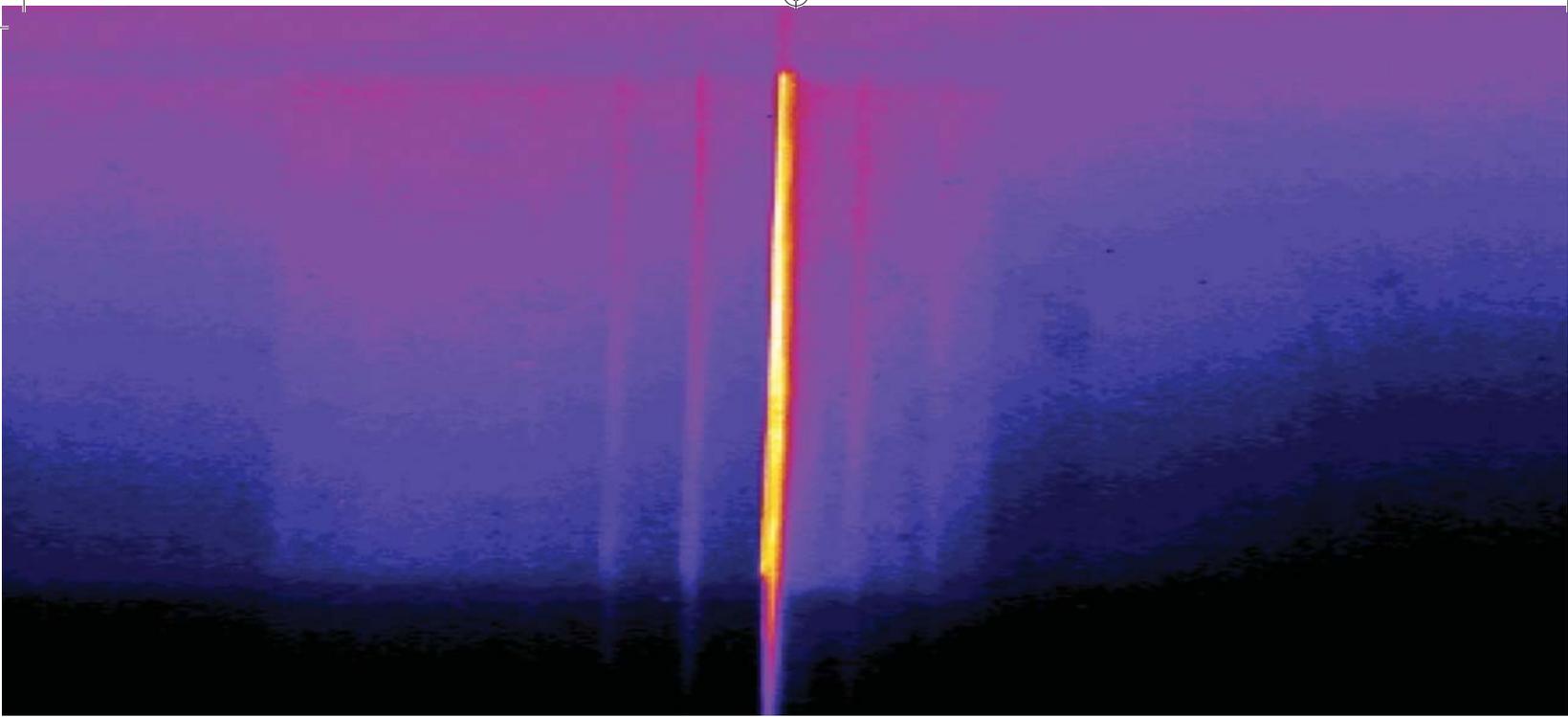
- Nous avons collaboré avec l'Université de Szeged sur une nouvelle méthode de mesure du chromatisme angulaire pour les lasers intenses. Cette collaboration a permis le dépôt d'un brevet sur un instrument (mesure de front d'onde à résolution spectrale) inspiré par la technique étudiée.

A. Boerzsoenyi et al, Optics Letters 38(4),410-412, FEB 15 2013

F. Giambruno et al, Applied Optics 50(17) 2617-2621, 2011

L. Antonucci et al, Optics Comm. 282(7) 1374-1379, 2009

F. Giambruno et al, Applied Physics B, Lasers and optics, march 25th 2013



Avancées scientifiques - Groupe FLEX

Sources X ultrabrèves

Le groupe FLEX étudie la physique de l'interaction laser-matière avec des systèmes laser ultrabrefs et intenses pour la production de sources de rayonnement EUV, X et gamma. Il est fortement impliqué dans la réalisation d'outils permettant leur caractérisation, leur optimisation (cohérence, flux crête ou moyen, divergence, polarisation, taille de source) ainsi que leur utilisation pour des expériences d'applications. Le spectre énergétique des sources que nous développons va de quelques 10 eV à plusieurs MeV. Elles offrent un panorama très complet pour nos utilisateurs ou pour de futures expériences d'application. Dans ce cadre, le LOA a été le premier laboratoire au monde à offrir du temps de faisceau (à travers LASERLAB) sur une ligne de lumière basée sur la génération d'harmoniques d'ordre élevé. Ce concept est maintenant repris au niveau national et international.

Le développement de sources XUV

- Harmoniques d'ordre élevé

Le travail que nous menons sur les harmoniques d'ordre élevé ne suit pas la voie classique prise par la majorité des laboratoires travaillant sur ce thème, à savoir la réalisation d'impulsions les plus courtes possible. Notre objectif consiste à réaliser une source de rayonnement XUV parfaitement maîtrisée avec des caractéristiques optiques permettant la réalisation d'applications comme l'imagerie X cohérente ou comme l'amplification dans un plasma ou dans un laser à électrons libres. Le critère le plus direct consiste à maximiser le nombre de photons émis par harmonique. Nous avons principalement étudié la génération à deux couleurs, c'est à dire en mélangeant un laser infrarouge avec sa fréquence double (émission dans le bleu). Nous avons obtenu une forte augmentation du nombre de photons émis vers 15 nm, facteur d'augmentation de 100 environ, tandis que vers 30 nm aucune amélioration notable n'a pu être obtenue.

Nous nous sommes également intéressés au front d'onde des harmoniques d'ordre élevé, qui est un paramètre clé pour les expériences d'imagerie XUV cohérente. Nous avons utilisé différentes stratégies pour améliorer ses caractéristiques. Nous avons d'abord utilisé un miroir déformable infrarouge, permettant de manipuler le front d'onde du laser générateur. Nous avons ainsi montré une légère influence sur le front d'onde des harmoniques sans réussir à

atteindre leur limite de diffraction. Nous avons alors étudié le front d'onde des harmoniques en configuration « deux couleurs » et avons mesuré un front d'onde limité par la diffraction ($\lambda/20$ root-mean-square à $\lambda=30$ nm), résultat qui est actuellement la référence au niveau international. Nous pensons que cet excellent front d'onde est obtenu par un phénomène de filtrage spatial. Le faisceau infrarouge assure la principale contribution à la génération d'harmoniques. Le faisceau bleu étant focalisé plus finement que ce dernier, seul le centre du foyer infrarouge est utilisé, qui est intrinsèquement la zone de meilleur front d'onde.

Dans le cadre du développement de nos applications, la polarisation (état, degré) est devenue un autre critère important. En effet, les expériences de magnétisme femtoseconde nécessitent un faisceau à polarisation bien contrôlée (linéaire pour la diffraction, circulaire pour l'holographie). En collaboration avec SPL, nous avons étudié la polarisation des harmoniques dans différentes configurations puis nous avons polarisé circulairement celles-ci soit par un système à 4 miroirs X, soit grâce à la technique du mélange à 2 ondes.

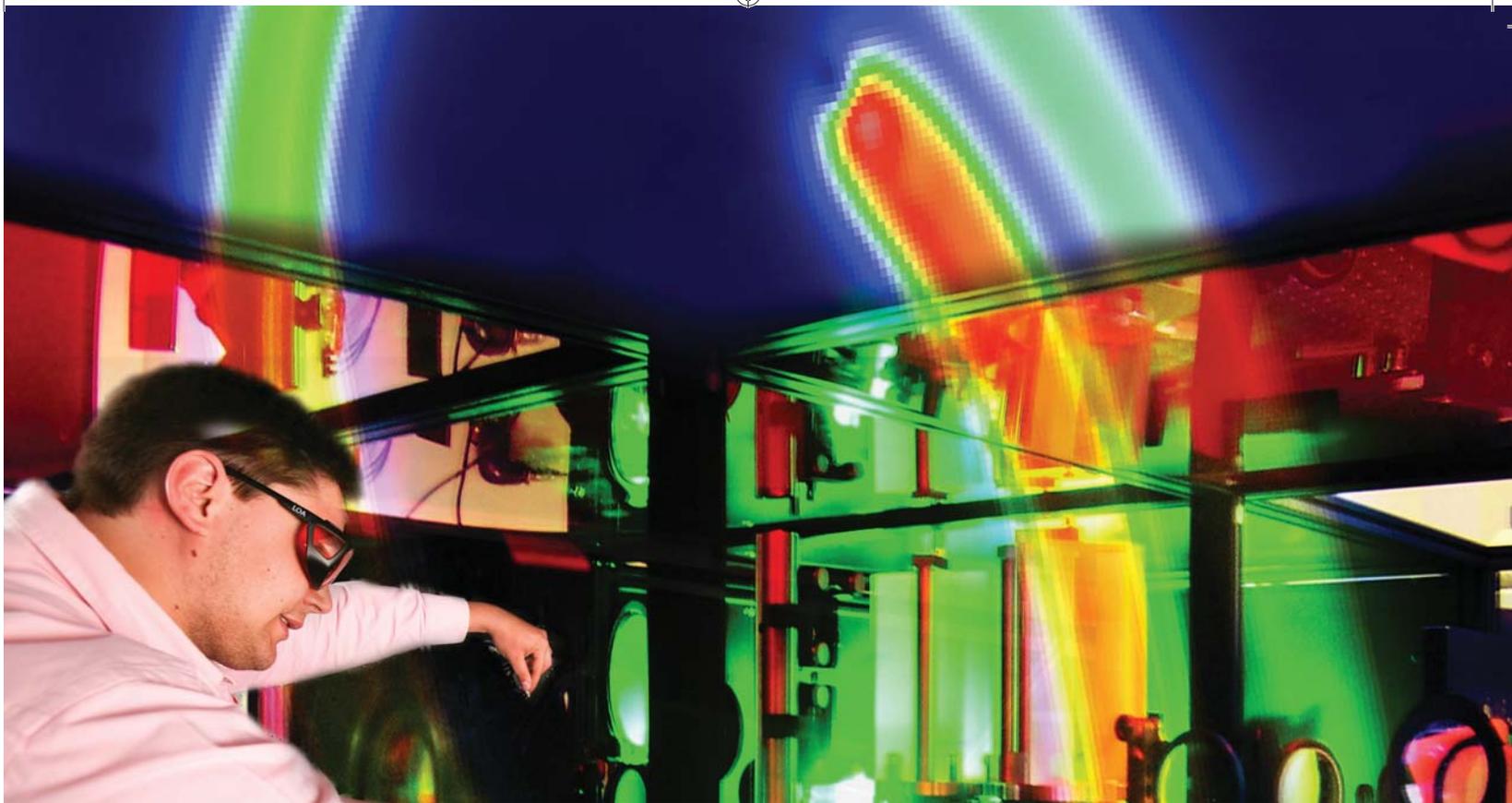
- Laser X OFI

Les travaux menés sur les lasers XUV OFI ont permis la réalisation de source laser monochromatique dans la gamme 30-40 nm de longueur d'onde, délivrant jusqu'à 1 μ J par tir en quelques picosecondes à une fréquence de 10 Hz. Nous avons réalisé un laser XUV composée de trois parties : l'injecteur (source d'harmoniques d'ordre élevé), l'amplificateur (plasma créé par OFI), et une

optique de relai d'image entre la source d'harmoniques et l'amplificateur (un miroir torique en incidence rasante). Nous avons ainsi obtenu un laser XUV aux propriétés optiques exceptionnelles : le faisceau est soit Gaussien, soit suit une distribution de Bessel et son front d'onde atteint $\lambda/10$ rms à 32 nm. L'amplification par le plasma permet de créer un faisceau dépourvu d'astigmatisme dont l'écart normal aberrant peut être aussi faible que $\lambda/10$ rms, ce qui est très proche de la limite de diffraction.

Dans le cadre d'une collaboration avec les laboratoires ISMO et LPGP/LASERIX, nous avons expérimentalement mesuré la largeur spectrale de l'impulsion amplifiée qui est de l'ordre de quelques mÅ (finesse de raie $\lambda/\Delta\lambda \sim 10^5$), malgré le fait que celle de l'impulsion harmonique soit bien plus large ($\lambda/\Delta\lambda \sim 10^2 - 10^3$). Le rétrécissement spectral de l'impulsion durant sa propagation dans l'amplificateur a été mis en évidence en mesurant sa largeur spectrale à différentes longueurs d'amplification. Ces résultats ont été confirmés par un modèle numérique simple résolvant l'équation de transfert radiatif et prenant en compte les valeurs d'élargissement spectral homogène et inhomogène. Nous avons étudié l'influence de divers paramètres tels que la densité du gaz, l'intensité harmonique injectée et le délai auquel cette harmonique est injectée sur la largeur spectrale du rayonnement.

Grâce à un nouveau jet de gaz à haute pression, ainsi que des techniques (guidage dans un canal plasma préformé par lasers fs/ns) assurant la propagation du laser infrarouge femtoseconde dans une colonne



de gaz étendue, nous avons pu démontrer pour la première fois la possibilité d'obtenir un effet laser à haute pression dans le krypton nickelloïde à des densités atomiques supérieures à 10^{20} cm^{-3} . L'effet laser obtenu dans le cas du guidage par canal plasma préformé a permis de mesurer un gain en énergie d'un facteur 10 par rapport à celui obtenu à une densité atomique de quelques 10^{17} cm^{-3} dans une cellule de gaz.

Cette expérience ouvre la voie à l'obtention d'impulsions laser XUV énergétiques et ultrabèves. Ce travail est également un pas encourageant vers la réalisation d'un laser XUV de longueur d'onde significativement plus courte. En effet, le schéma de pompage par recombinaison est plus adapté que le schéma collisionnel pour l'obtention d'inversions de population dans des transitions énergétiques. Ce schéma, tombé en désuétude depuis plusieurs années, nécessite la production contraignante d'un plasma dense et froid (température électronique

de quelques dizaines d'eV). La création de ce plasma par ionisation par le champ laser est bien indiquée car il autorise une inversion de population mettant en jeu le niveau fondamental de l'ion lasant, qui correspond donc à une transition de courte longueur d'onde. C'est l'objectif du projet ANR ROLEX qui a débuté 2012 pour une durée de 3 ans et dont nous sommes les initiateurs et coordinateurs.

- Modélisation des lasers X en cible solide

L'augmentation de la densité du milieu lasant semble favorable à l'obtention d'impulsions laser XUV sub-picosecondes. Naturellement, nous nous sommes donc intéressés à l'amplification des harmoniques dans un plasma créé à partir d'une cible solide. Les contraintes expérimentales ne nous ont pas permis de réaliser ce type d'expérience en France. Nous avons donc principalement effectué une étude numérique extensive, suivie récemment de deux expériences

expériences au Colorado State University, USA. Nous avons développé un code Maxwell-Bloch dépendant du temps, unique en France, permettant de simuler ce type d'études.

De la même manière qu'en cible gazeuse, nous avons observé numériquement que l'harmonique injecté dans un plasma était peu amplifiée (environ 3 fois) mais créait une onde de sillage de quelques ps et contenant plusieurs μJ . Nous avons également montré numériquement qu'il était possible d'obtenir une impulsion laser XUV de 80 fs et environ 1.5 μJ en injectant des harmoniques de 200 fs dans un plasma deux fois plus dense que les plasmas utilisés couramment. Ce dernier point a été validé par nos simulations hydrodynamiques bidimensionnelles (collaboration avec l'Universidad Politecnica de Madrid, Espagne). Des impulsions de 100 fs et 20 μJ sont également obtenues en utilisant une succession de deux plasmas. Un tel laser XUV nécessite seulement 10 J de laser de pompe, soit seulement la moitié de l'énergie disponible avec le système laser LASERIX, et produirait des impulsions proches de celles des lasers à électrons libres XUV comme FLASH ou FERMI@ELETTRA.

Nous avons également proposé et complètement étudié un schéma de type Chirped Pulse Amplification mais transposé dans les rayons X (Nature Photonics 2012, cité en couverture et dans la rubrique « News and Views »). Les harmoniques sont étirées puis amplifiées et enfin recomprimées. Ce type de montage a démontré des efficacités de diffraction dans l'ordre 1 de 70% à 30 nm. Il

serait possible d'atteindre 0.5 mJ, 200 fs avec LASERIX et 5 mJ, 200fs (ou plus court) avec APOLLON.

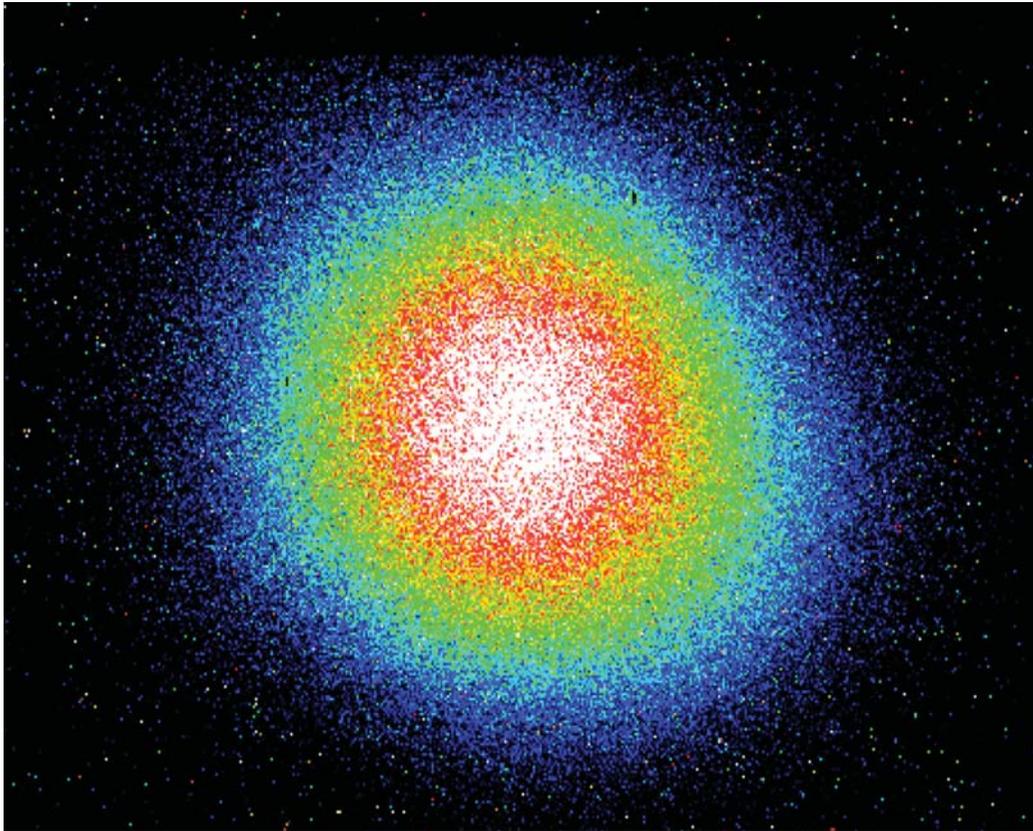
Le développement de sources X durs

Le groupe FLEX développe aussi des sources de rayonnement X basées sur l'interaction laser-plasma en régime relativiste et leurs applications. Ces travaux portent sur la source Bétatron, la source Compton, la source onduleur plasma et la source onduleur classique.

- Rayonnement Bétatron.

Le rayonnement Bétatron est naturellement produit dans un accélérateur laser-plasma. Il s'agit d'un rayonnement de type synchrotron. Il est émis lorsque des électrons sont accélérés et oscillent dans l'onde plasma accélératrice créée dans le sillage de l'impulsion laser. Dans le cas le plus favorable, la structure accélératrice est une cavité ionique qui a une forme de bulle. Expérimentalement, le rayonnement Bétatron est obtenu en focalisant une impulsion laser femtoseconde intense dans un gaz d'hélium. Une collaboration étroite avec le laboratoire ALLS à l'INRS au Canada nous a permis d'étudier le rayonnement Bétatron produit en utilisant un laser de 100 TW. Conformément aux prédictions numériques, nous avons démontré qu'à cette puissance, le rayonnement Bétatron atteint plusieurs dizaines de keV.

Par ailleurs, nous avons étudié précisément les corrélations entre le rayonnement Bétatron et les électrons qui le produisent. Pour cela, nous avons produit des électrons quasi-



Faisceau de rayonnement X femtoseconde Bétatron produit par l'oscillation d'électrons énergétiques dans un onduleur plasma créé par laser.

monocinétiques d'énergie accordable (entre 50 et 150 MeV environ) en utilisant un accélérateur laser plasma en géométrie de collision d'impulsions. Au cours de l'expérience réalisée au LOA, nous avons simultanément mesuré le spectre du rayonnement Bétatron et le spectre du faisceau d'électrons. Nous avons obtenu des corrélations directes qui ont permis de valider notre modèle numérique et la forme synchrotron du spectre. Ce travail pionnier a été publié dans *Physical Review Letters* en 2011.

Pour mesurer à quel instant de l'interaction et sur quelle longueur de plasma le rayonnement est produit, nous avons réalisé une expérience utilisant un capillaire rempli de gaz plutôt qu'un jet de gaz. Dans ce cas, le faisceau de rayonnement Bétatron émis est partiellement diaphragmé par la sortie du

capillaire. En mesurant le diamètre du faisceau diaphragmé et la taille des gradients de l'ombre du capillaire nous pouvons savoir où et sur quelle longueur le rayonnement a été produit. Les mesures réalisées démontrent que la longueur d'émission est, dans notre régime d'interaction, de l'ordre de quelques centaines de microns et dépend de la densité du plasma. Cette méthode de cartographie donne des informations importantes pour le développement des accélérateurs laser-plasma car elle permet de localiser l'injection et de connaître la longueur d'accélération des électrons. Ces travaux ont été publiés dans *Physical Review Letters* en 2011.

La production d'électrons quasi-monocinétiques dans un accélérateur laser-plasma est déterminante pour le développement des sources de rayonnement X. Nous avons

vu précédemment que cela est possible en utilisant le schéma de collision d'impulsions. Cependant, cette technique est délicate et complexe à mettre en œuvre. Nous avons démontré qu'il est possible d'utiliser un schéma plus simple basé sur l'injection dans un gradient de densité. Deux impulsions lasers sont encore utilisées mais leur superposition spatiale et temporelle ne nécessite pas de grande précision. L'expérience a eu lieu au LOA. Au cours de cette expérience nous avons pu mettre en évidence la possibilité de produire des faisceaux d'électrons quasi-monocinétiques d'énergie accordable jusqu'à environ 150 MeV.

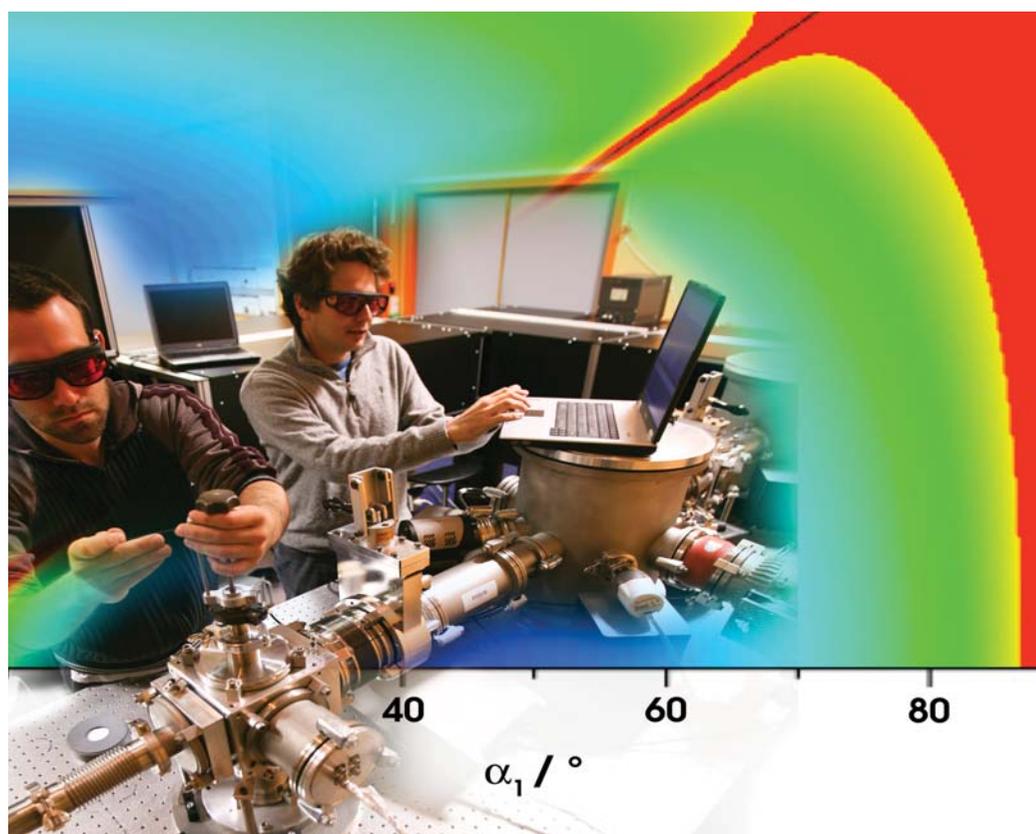
Fort du contrôle sur la source Bétatron, nous l'avons utilisé pour réaliser de la radiographie en contraste de phase. Cette technique requiert une source petite taille et très brillante. La source Bétatron qui a une taille de

source de l'ordre de 1 micron est bien adaptée. En collaboration avec l'INRS au Canada, nous avons démontré la possibilité de réaliser de la radiographie à contraste de phase en utilisant un dispositif expérimental simple et compact. Une guêpe était placée à un mètre de la source, le détecteur était placé à 2 mètres de la guêpe.

-Onduleur plasma et conventionnel.

Nous avons réalisé un travail théorique et numérique sur la mise en place d'un onduleur à onde plasma. Dans ce schéma, les électrons sont d'abord accélérés puis oscillent dans un "onduleur à onde plasma" séparé. L'onduleur à onde plasma est une onde plasma qui se propage perpendiculairement au faisceau d'électron. Nous avons montré que du rayonnement X quasi monochro-

Ligne expérimentale de rayonnement XUV (harmoniques d'ordre élevé de la longueur d'onde fondamentale du laser femtoseconde).



matique et accordable pourrait être produit dans la gamme spectrale de quelques dizaines de keV.

Nous avons aussi réalisé une première expérience dans le cadre du développement de sources de rayonnement X basées sur le couplage d'un accélérateur plasma et d'un onduleur classique ouvrant la voie à des sources de type "laser à électrons libres" compactes actuellement étudiées dans plusieurs laboratoires. Cette expérience difficile n'a pas donné de résultats concluants bien que du rayonnement ait été clairement détecté.

- Rayonnement de diffusion Compton.

La production de faisceaux de rayonnement X/gamma par diffusion Compton est le résultat le plus important obtenu récemment sur la thématique des sources X par électrons accélérés au niveau international. Il s'agit de faire diffuser un laser femtoseconde intense sur un faisceau d'électron relativiste se propageant en sens inverse. Expérimentalement, ce schéma a déjà été démontré en utilisant des accélérateurs conventionnels. Cependant, ces machines sont de grandes dimensions.

Un schéma entièrement optique est proposé depuis de nombreuses années. Il repose sur l'utilisation de deux faisceaux lasers. Un laser produit le faisceau d'électrons dans un accélérateur laser-plasma et le second diffuse sur le paquet d'électrons accélérés.

Cependant ce schéma n'a jamais été démontré en raison d'importantes difficultés expérimentales. Nous avons démontré une méthode beaucoup plus simple et efficace. La géométrie utilise un seul faisceau laser. Il est focalisé dans un jet de gaz et accélère des électrons. A l'arrière du jet, une lame d'un matériau quelconque a été placée. Ionisée par le piédestal de l'impulsion laser, cette lame devient un « miroir plasma » qui réfléchit le laser. Le laser interagit alors avec les électrons qui le suivent dans son sillage produisant un faisceau de rayonnement X.

Nous avons utilisé le laser 30 TW du LOA de la Salle Jaune, focalisé dans un jet de gaz de 3 mm d'hélium, pour produire un faisceau d'électrons à spectre large s'étendant jusqu'à environ 100 MeV. Le laser était réfléchi par un miroir plasma produit sur une lame de 1 mm de verre. Le rayonnement produit a été mesuré avec un écran scintillateur ou un écran radio luminescent à mémoire. L'origine du rayonnement a été vérifiée par de nombreux tests permettant d'exclure la contribution d'autres processus radiatifs. Le rayonnement produit est collimaté (20 mrad FWHM). Son spectre est large et s'étend sur plusieurs centaines de keV. La taille de source est de l'ordre de 1 micron. Ces résultats ont été publiés dans la revue Nature Photonics en Mai 2012, fait la une et la couverture du journal, avec également divers articles de presse du type "News and Views". Ces travaux ouvrent d'importantes perspectives de développement. En particulier, ce mécanisme pourrait permettre de produire des faisceaux de rayonnements quasi-énergétiques et ac-

cordables du spectre X aux rayonnements γ .

L'Optique X cohérente et la métrologie X

L'équipe FLEX s'est démarquée depuis longtemps pour ces travaux pionniers en optique XUV cohérente, holographie, interférométrie et senseur de front d'onde XUV. Nous continuons à travailler activement sur ces thèmes avec en particulier une collaboration étroite avec la société Imagine Optic pour le développement de senseurs et le CEA pour la diffraction X.

Nous avons ainsi réalisé deux campagnes d'utilisation de senseurs XUV à 30 eV et 800 eV pour aligner des optiques de type Kirkpatrick-Baez sur lasers à électrons libres (LCLS et FERMI@ELETTRA). Une personne a aussi participé à une étude menée par Imagine Optic d'une source à 13.5 nm développée par un industriel coréen dans le cadre de la lithographie EUV.

Parmi de nombreux travaux en optique X cohérente, nous avons effectué des collaborations fructueuses avec le CEA et l'IST au Portugal sur l'holographie attoseconde. Le concept consiste à enregistrer un hologramme en utilisant plusieurs harmoniques successives (jusqu'à 5) de manière à préserver le train d'impulsion attoseconde (ici 250 as). Les résultats, en cours de traitement, semblent démontrer la viabilité du concept.

La Physique du Solide utilisant une sonde X ultra-rapide.

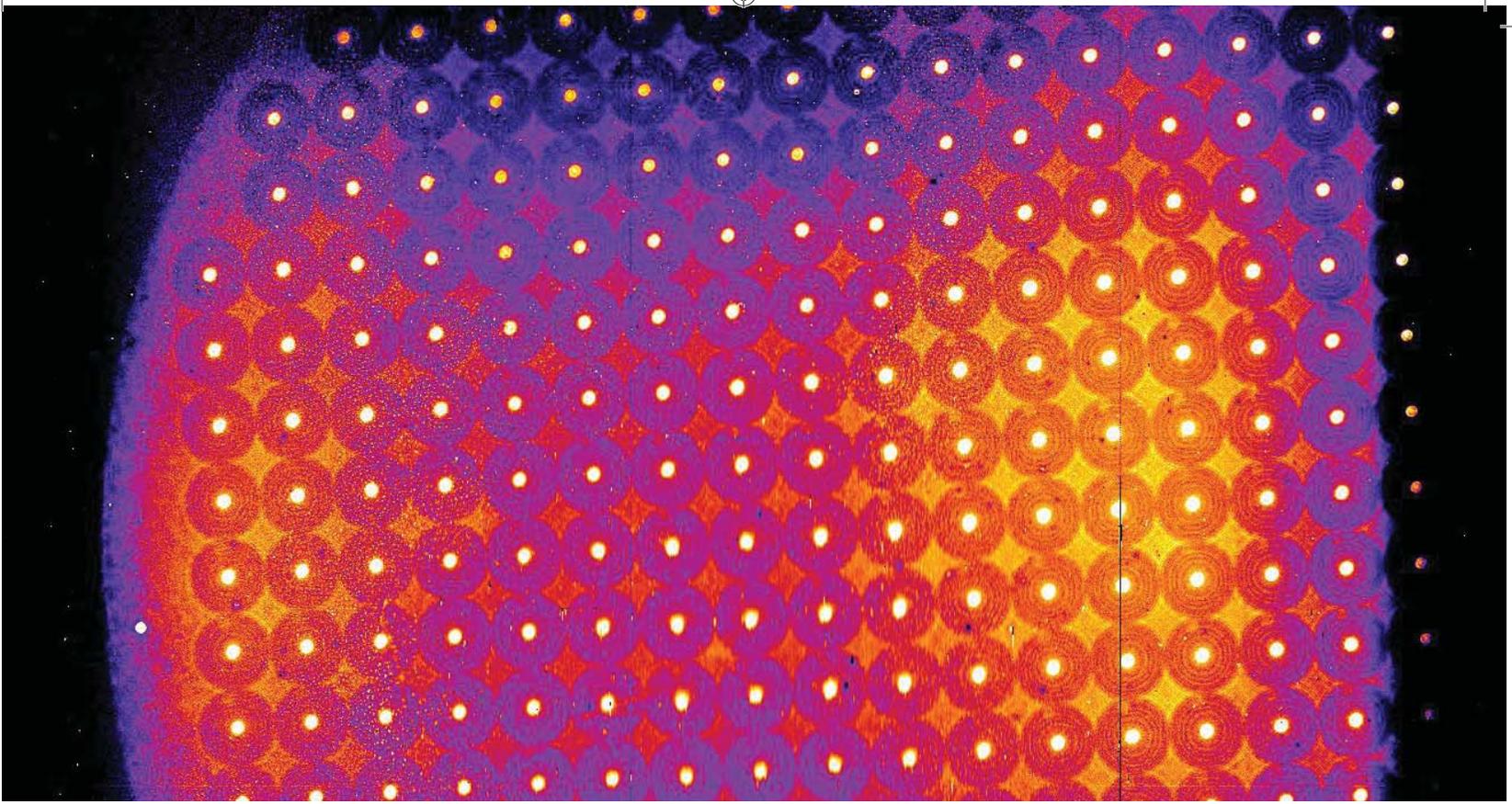
Parmi le panel d'applications de nos sources X, la physique du solide a toujours eu une attention particulière car bien adaptée pour

mettre en avant la très courte durée des impulsions X.

- Isolants topologiques et graphène.

Une de nos activités de recherche se base sur l'utilisation de lasers femtosecondes pour exciter et sonder la dynamique électronique et de phonons cohérents au sein de matériaux à l'état solide. Nous avons étudié plusieurs types de matériaux, en partant de structures simples comme le bismuth jusqu'aux matériaux fortement corrélés. Récemment, nous avons débuté l'étude de la dynamique de phonons cohérents dans les isolants topologiques. Nous avons utilisé deux techniques sur ce type de matériau: la spectroscopie résolue dans le temps et la spectroscopie ultrarapide de photoélectrons résolue en angle (ARPES) réalisée avec le LPS d'Orsay. Ces deux techniques nous ont permis d'étudier la dynamique des électrons photoexcités dans le cône de Dirac à la surface du cristal ainsi que leur couplage avec les phonons cohérents.

Récemment, nous avons encore élargi le champ d'application à un nouveau nanomatériau, le graphène, en collaboration avec la Columbia University de New York aux Etats-Unis. Ce matériau bidimensionnel, composé uniquement d'atomes de carbone, est le candidat numéro un pour toutes les applications en nanoélectronique et photovoltaïque. Nous avons étudié l'interaction électron-phonon par l'intermédiaire de l'étude de phonons optiques cohérents. Nous avons mesuré le mouvement de cisaillement de seulement deux feuilles de graphène qui est la brique fondamentale pour construire la dynamique de phonon optique d'un cristal



de graphite tridimensionnel.

- Femto-magnétisme.

L'activité que nous développons au LOA, en collaboration avec le laboratoire LCPMR, concerne la dynamique d'aimantation ultrarapide (femtoseconde et picoseconde). En particulier, nous étudions la désaimantation de couches minces magnétiques soumises à une impulsion laser femtoseconde. L'originalité de notre approche est d'utiliser une source d'harmoniques d'ordre élevé pour sonder l'aimantation des échantillons. Ceci nous procure trois avantages par rapport aux sondes optiques classiques : une résolution temporelle accrue ; une résolution spatiale nanométrique ; une discrimination entre les différents atomes magnétiques. Ces avantages nous ont permis d'observer pour la première fois la désaimantation ultrarapide au niveau de domaines magnétiques de taille nanométrique. L'analyse de ce résultat indique que le transfert de spin joue un rôle

lors de la désaimantation. Nous avons aussi obtenu le plus faible temps de démagnétisation pour une multi-couche de $(\text{Co/Pd})_{30}$. Ce travail a été publié dans Nature Communication en 2012.

S. Corde et al, Rev. Mod. Phys. 85, 1 (2013).

E. Oliva et al, Nature Photonics, 6, 674 (2012)

K. Ta Phuoc et al, Nature Photonics 6, 308–311 (2012)

B. Vodungbo et al, Nature Communication, 3, 999 (2012)

D. Boschetto et al, Physical Review Letters 100, 027404 (2008)

Caractérisation Shack-Hartmann de faisceau laser XUV ultrabref.



Avancées scientifiques - Groupe PCO

Physique du Cycle Optique

Le groupe PCO travaille sur la physique en régime attoseconde: développement de lasers capables de produire des impulsions de quelques cycles optiques en durée avec une puissance instantanée la plus élevée possible, et physique de l'interaction associée. L'objectif est d'observer et de comprendre la dynamique des électrons d'un plasma induit par laser à l'échelle de temps attoseconde et générer des faisceaux de rayons X et de particules énergétiques de très courte durée afin de les utiliser pour sonder le mouvement ultrarapide des électrons au sein de la matière.

L'activité du groupe a été marquée par l'aboutissement de plusieurs années de développement d'une plateforme d'interaction « laser-plasma » à ultra-haute intensité, opérant au kHz. Le projet a bénéficié du fort soutien financier initial de l'ANR au projet (Chaire d'Excellence 2004 – 600k€ et programme Blanc 2006 « ILAR » en partenariat avec le LULI et le CEA-Saclay – 400k€). C'est ainsi qu'en 2012, nous avons pu réaliser les premières expériences au monde de contrôle cohérent de la dynamique électronique collective d'un plasma à l'échelle attoseconde (Nature Physics 2012 et Nature Photonics 2012). Ce type d'expériences a été rendu possible grâce à l'association unique d'un laser produisant des impulsions de quelques cycles optiques contrôlés de forte intensité et d'une cible solide mobile assurant des conditions reproductibles d'interaction au kHz pour lequel un brevet a été déposé. Grâce à des collaborations académiques soutenues et des partenariats étroits avec les industriels clés de la technologie laser femtoseconde, le groupe PCO s'est forgé une position de numéro un mondial dans le domaine.

Le développement du laser CEP multi-mJ de quelques cycles optiques

Au début du projet, nous avons construit la première chaîne laser en France à délivrer des impulsions de quelques cycles optiques stabilisées en phase de porteuse (CEP) au niveau d'énergie multi-mJ. Ce développement a été le fruit d'une collaboration avec les sociétés Femtolasers GmbH (Autriche) et Fastlite (France). Grâce à cette collaboration, nous avons été un des premiers groupes au monde à démontrer la stabilisation en CEP d'un laser fs amplifié au niveau multi-mJ (Optics Letters 2009). Ces résultats ont notamment permis à Femtolasers

GmbH de conserver sa place de numéro un mondial de la vente de systèmes laser fs amplifiés stabilisés en phase.

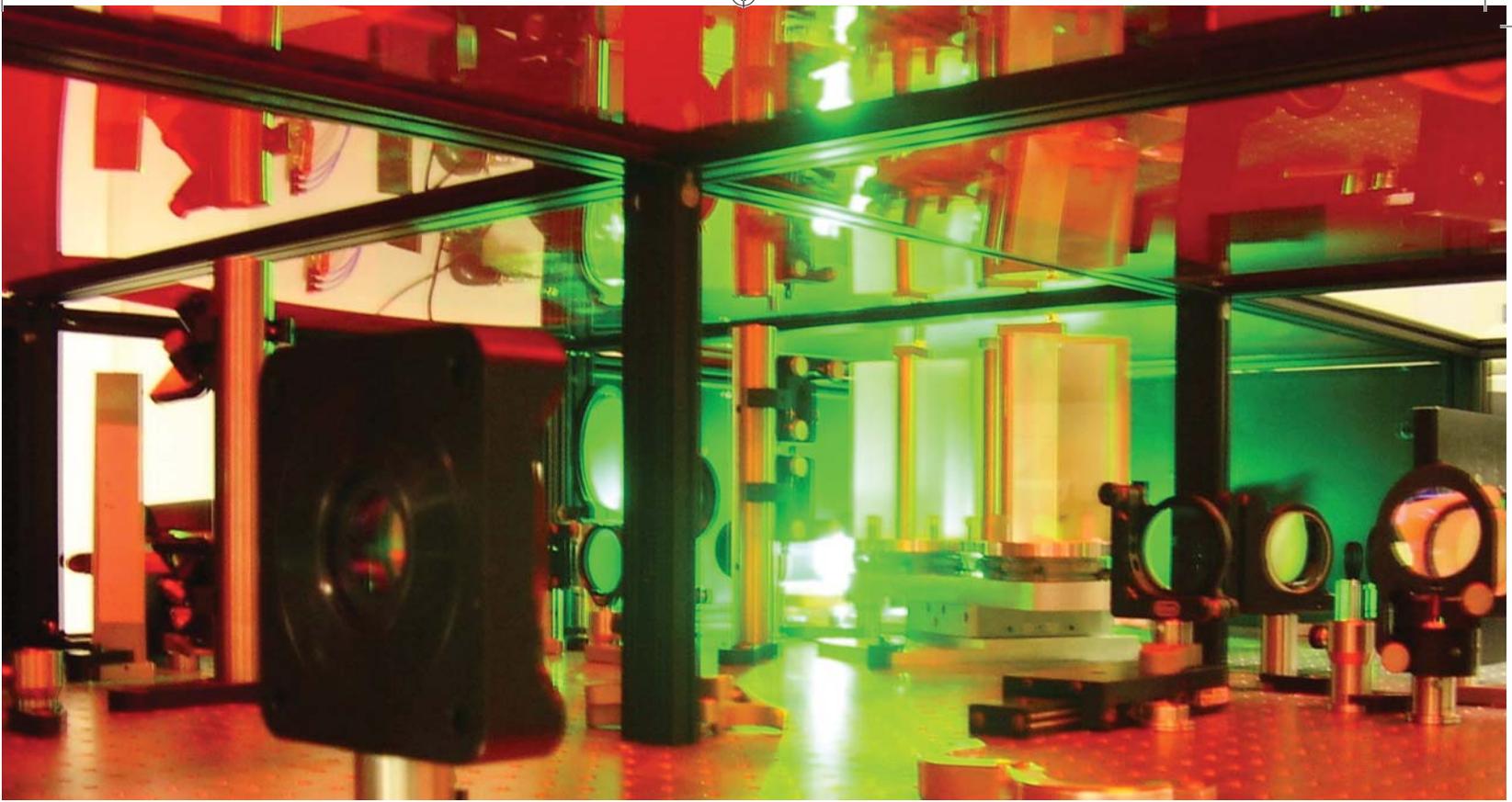
En collaboration avec la société Fastlite, nous avons aussi démontré le contrôle automatisé de la CEP grâce à l'utilisation d'un filtre acousto-optique dispersif programmable (Dazzler) directement intégré dans la chaîne laser. Depuis, tous les systèmes fs amplifiés produits par Femtolasers GmbH intègrent un Dazzler en série. Grâce à ce système laser unique, nous avons ensuite démontré une technique simple et innovante pour comprimer les impulsions multi-mJ à des durées de quelques cycles optiques dans une fibre creuse remplie de gaz rare avec une très grande efficacité (> 60%), grâce à l'injection de la fibre avec des impulsions polarisées circulairement. Nous avons ainsi généré, pour la première fois, des impulsions < 5 fs avec une énergie supérieure au mJ au kHz avec un contrôle optimal de la CEP.

Cette approche permet de produire en routine des impulsions sub-5fs au niveau multi-mJ avec un dispositif (pression statique de gaz à l'intérieur de la fibre) plus fiable et plus simple d'utilisation que ceux de grande taille basés sur le pompage différentiel. La preuve en est qu'un étudiant ou post-doc peut à lui seul opérer le laser de manière stable pendant ses expériences d'interaction sur cible solide avec un contrôle optimal de la qualité spatiale et temporelle des impulsions (contrôle de la CEP < 200 mrad à des intensités proches de 10^{18} W/cm² sur des tâches focales < 2 μ m pendant plusieurs heures). Cette technique a d'ailleurs été reprise par Femtolasers GmbH comme solution commerciale

robuste pour produire des impulsions de quelques cycles optiques au niveau multi-mJ.

- Démonstration des schémas de post-compression temporelle.

Dans le cadre d'une campagne d'expériences LaserLab, nous avons collaboré avec l'Imperial College de Londres (ICL) afin d'étudier de manière systématique l'utilisation de la polarisation circulaire dans les schémas de post-compression basés sur le pompage différentiel et pouvant accommoder des énergies laser plus importantes. L'ICL commercialise actuellement une version basse énergie du dispositif. Le bénéfice de nos expériences communes a été double : D'une part, elles ont permis d'améliorer la robustesse mécanique du dispositif commercial de l'ICL et, d'autre part, elles nous ont permis de démontrer, pour la première fois, que le pompage différentiel de la fibre creuse ne dégrade pas la CEP des impulsions lasers, ce qui devrait avoir un impact important pour les équipes de la communauté attoseconde qui ont recours à ce type de dispositif. Une toute nouvelle campagne d'expériences LaserLab a été réalisée à l'automne 2013, en collaboration avec des chercheurs du Laser Laboratorium e.V. de Goettingen en Allemagne, afin de tester la post-compression d'impulsions de plus forte énergie dans des fibres creuses « étirées » à très grand rayon de courbure, selon une méthode brevetée par ce laboratoire. La combinaison de nos avancées dans le domaine (utilisation de la polarisation circulaire, contrôle de la CEP en pompage différentiel) et de cette nouvelle technologie de fibre devrait nous permettre



de développer un schéma adapté à la compression d'impulsions > 10 mJ, un objectif que l'on s'est fixé pour la jouvence en cours du laser de la Salle Noire. Cette campagne devrait mener à une publication marquante dans le domaine ainsi qu'à la commercialisation d'un nouveau dispositif plus performant, en partenariat avec le LOA.

La Jouvence du laser CEP à une énergie de 10 mJ

La jouvence en cours de système laser de la Salle Noire vise à atteindre une énergie de 10mJ avec des impulsions de 20 fs à fort contraste ($>10^{10}$) au kHz. Dans le cadre de la campagne Laserlab avec le Laser Laboratorium e.V., ces impulsions seront ensuite injectées dans un dispositif de post-compression basé sur une fibre creuse « étirée » pour produire, de manière robuste, des impulsions de 5 mJ, 5 fs à fort contraste, livrables sur cible au kHz

à des intensités relativistes proches de 10^{19} W/cm² avec un contrôle optimal de la CEP. Cette jouvence s'appuie sur plusieurs développements entrepris par le groupe PCO au cours des 4 dernières années :

- Le développement d'un filtre à contraste efficace.

Il est basé sur la technique de génération de polarisation croisée (XPW, version 3.0) à la fois efficace et pouvant accommoder de fortes énergies laser et des durées ultracourtes financée par le programme ANR JC/JC 2009 « UBICUIL ».

Une collaboration avec le Laboratoire Charles Fabry de l'Institut d'Optique sur le développement du front-end du laser 10PW AP-POLON nous a permis de développer un filtre XPW compact, efficace et versatile, fonctionnant jusqu'à 13mJ en entrée (résultats obtenus avec le groupe ILM du LOA sur le laser

100Hz de la Salle Blanche). Nous avons ainsi démontré des efficacités record (25% en routine) pour le filtrage par XPW d'impulsions sub-30fs grâce à un concept innovant de filtrage spatial mis au point à travers cette collaboration. Une version améliorée du filtre XPW (version 3.2) a été intégrée dans la nouvelle chaîne laser actuellement en construction en Salle Noire. Par ailleurs, en collaboration avec l'ICFO de Barcelone en Espagne, nous avons récemment étendu la validité de ce même concept aux lasers fonctionnant dans l'IR moyen, ce qui nous met dans une position inégalée pour fournir les briques technologiques nécessaires au développement de lasers de type OPCPA à très forte puissance crête dans l'IR moyen, actuellement en plein essor.

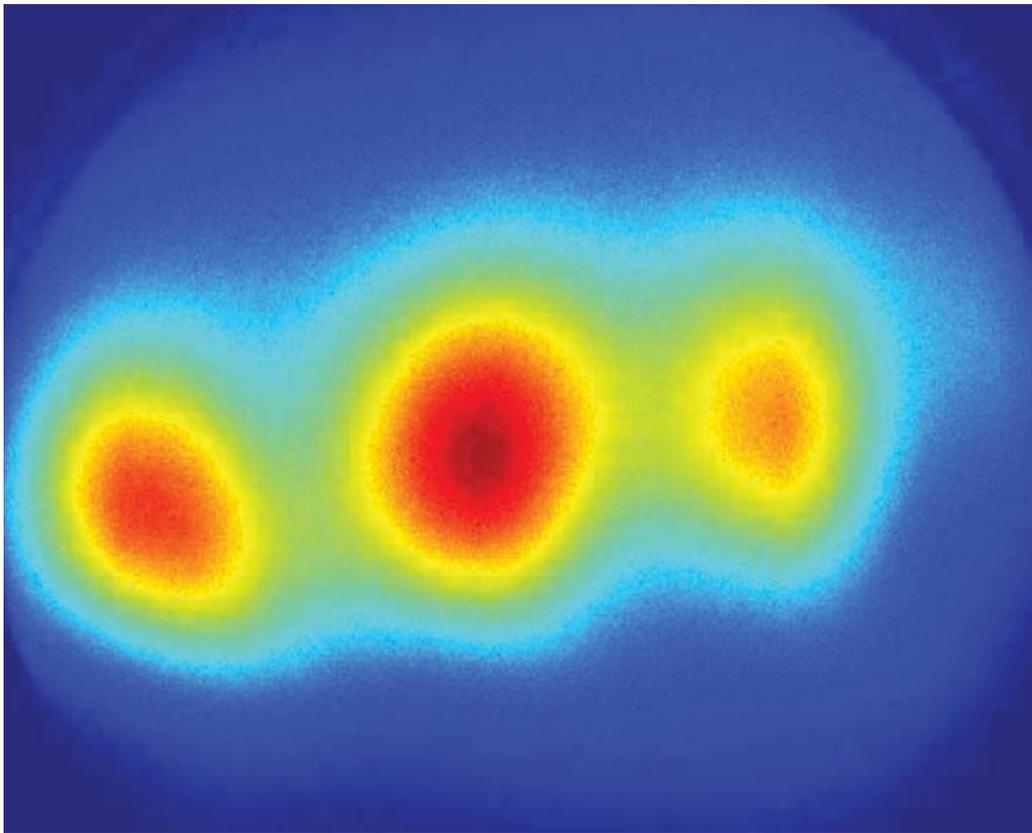
De manière générale, cette nouvelle technique de filtrage permet la génération d'impulsions de quelques cycles optiques (sub-10fs) de haute fidélité temporelle, tout en préservant la CEP, et donc idéales pour l'injection de chaînes lasers ultracourtes de haute puissance crête (Applied Physics B 2010), ce qui a validé un des principaux objectifs du projet ANR « UBICUIL ». Il est intéressant de noter que cette technique commence maintenant à être intégrée par les fabricants de laser dans la plupart de leurs chaînes TW-PW (Amplitude Technologies, TOSA, Femtolasers GmbH, National Energetics...).

C'est dans ce but précis qu'en 2011, nous avons finalisé le transfert vers TOSA d'un filtre XPW (version 2.0) basse énergie qui a été intégré dans la première chaîne PW commerciale au monde « BELLA », installée au Berkeley Lab (LBNL). Ce type de filtre est

désormais proposé en série sur toutes les chaînes TW-PW produites par TOSA, avec le label « LOA ». Dans le cadre d'un contrat CIFRE (Thèse Aurélien Ricci), TOSA nous a fait un prêt à long terme d'un laser de type Femtocube (1mJ, 35fs, 5kHz) afin de développer les filtres XPW de prochaine génération (notamment l'XPW 3.0). Cette chaîne est aussi utilisée pour valider de nouveaux concepts de filtrage non linéaire d'impulsions courtes basés sur l'XPW. Ces travaux font notamment l'objet de campagnes LaserLab régulières avec nos collègues co-inventeurs de la technique XPW, de l'Université de Sofia en Bulgarie.

- schémas compacts d'étirement massif (bulk) et de compression par grismes.

Ce développement s'effectue avec la société Fastlite (projet ASTRE 2010 GRISLI) pour un contrôle de la gestion de la dispersion dans les chaînes laser CPA. L'utilisation de grismes (réseau + prisme) en fin de chaîne permet la compression d'impulsions fortement étirées par propagation étendue dans le bulk sans que le Dazzler ait à gérer une phase spectrale d'ordre trois trop importante et perdre en efficacité, tout en réduisant l'intégrale B accumulée dans la chaîne. Dans ce cadre, nous avons réalisé la première démonstration d'une chaîne CPA fs avec stabilisation de la CEP, intégrant la technologie « grismes ». Le facteur étirement utilisé dans la nouvelle Salle Noire est 10 fois supérieur au précédent, ce qui nous permet d'atteindre aujourd'hui en Salle Noire des énergies comprimées >10mJ avec le contrôle de la CEP,



Génération d'impulsions attosecondes uniques et isolées spatialement par interaction d'un laser de quelques cycles optiques avec une cible solide.

du à la grande compacité du couple étireur/compresseur.

Du point de vue expérimental, en 2011, nous avons réalisé la première démonstration de génération d'harmoniques sur cible solide (plasma surdense) à une cadence de 1kHz. Cette première mondiale a été possible grâce au développement d'un porte-cible innovant assurant des conditions reproductibles tir-à-tir au kHz.

Grâce au filtrage spatial des impulsions au travers de la fibre creuse utilisée pour la post-compression, nous avons démontré des tâches focales inférieures à 2 microns sans avoir recours à la correction active de front d'onde du faisceau. Dans ces conditions notre intensité sur cible est supérieure à $3 \times 10^{18} \text{W/cm}^2$, proche de la frontière relativiste, correspondant aux intensités les plus élevées jamais atteintes avec des impulsions

de 2 cycles optiques. Les toutes premières expériences de génération d'harmoniques sur cible solide ont eu lieu début 2010. Grâce au contrôle interférométrique en temps réel de la position de la surface de la cible par rapport au laser, nous pouvons contrôler la position de la cible par rapport au faisceau laser avec une précision de l'ordre de quelques dizaines de nm.

La physique de l'interaction et régime du cycle optique

- Démonstration de l'accélération ionique

La même année, une collaboration avec le groupe SPL du LOA nous a aussi permis de caractériser un nouveau régime d'accélération de protons sur cible solide au kHz. Fort du succès de ces expériences, deux étudiants du groupe PCO et SPL ont

reçu le prix Louis Gerondeau/Zodiac 2011 de l'Ecole Polytechnique pour leur projet de développement commercial de cibles de précision pour l'interaction laser-plasma à haute intensité. A travers l'obtention de plusieurs prix d'innovation et d'un fort soutien à la valorisation de la part des tutelles du LOA, ils ont créé, en juin 2013, une société de type « spin-off » appelée Sourcelab (www.sourcelab-plasma.com) qui commercialise les instruments issus de la recherche innovante sur l'interaction laser-plasma réalisée au LOA (cibles gaz, cibles solides).

- Démonstration du contrôle de la dynamique de plasma à l'échelle attoseconde

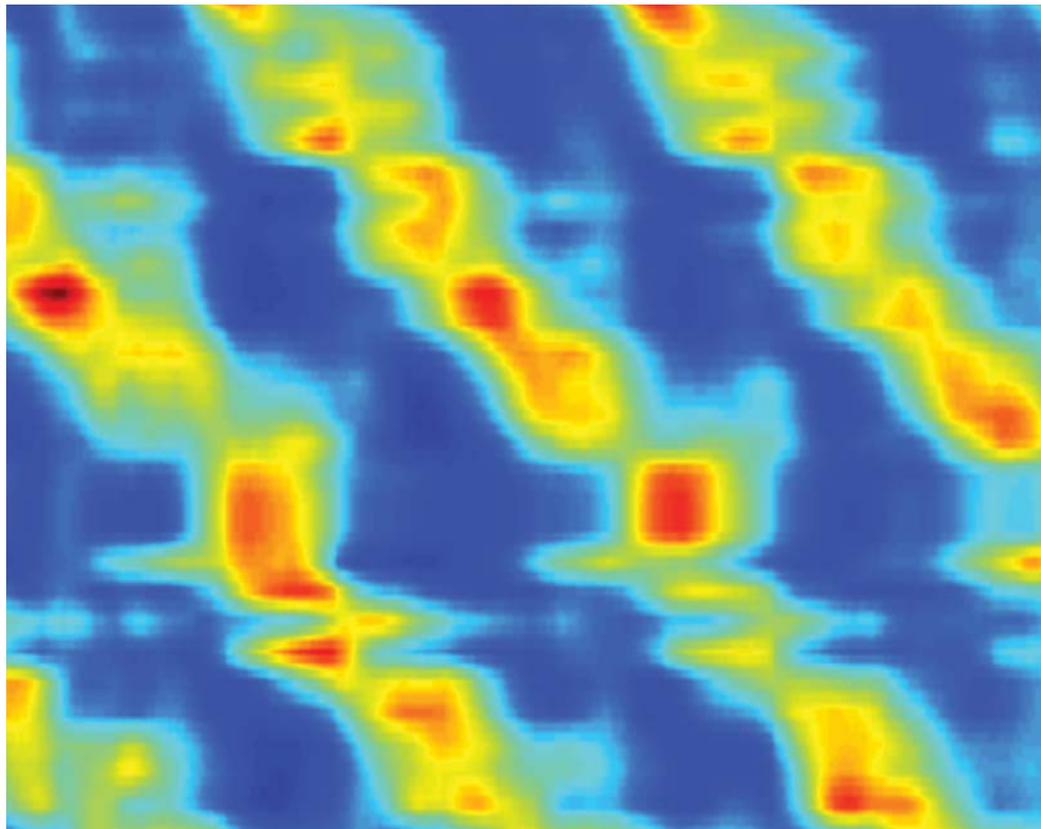
La période 2011-2012 a été dédiée à l'exploitation de cette plateforme

d'interaction laser-plasma à haute cadence en Salle Noire. Grâce à cet ensemble expérimental unique au monde, nous avons pu démontrer pour la première fois le contrôle, à l'échelle attoseconde, de la dynamique électronique d'un plasma surdense à des intensités quasi-relativistes ($\sim 10^{18}$ W/cm²). La publication des résultats de cette expérience pionnière a d'ailleurs fait la couverture de l'édition de juillet 2012 du journal Nature Physics.

- Mise en évidence de la génération d'impulsions attosecondes uniques

Fort de ce résultat, et en collaboration avec le groupe PHI du CEA-Saclay, nous avons réussi à générer des impulsions attosecondes isolées pour la première fois sur cible solide, grâce à la technique du « phare attoseconde

Contrôle sub-cycle optique du train d'impulsion attoseconde. Signature spectrale de la dépendance en CEP du rayonnement XUV produit par le laser Salle Noire contrôlé en phase.



» (Nature Photonics 2012), pour laquelle la rotation du front d'onde de l'impulsion interagissant avec le plasma fait qu'une impulsion attoseconde isolée est générée dans une direction différente.

La jouvence en cours de la Salle Noire va nous permettre d'explorer la physique des plasmas relativistes à l'échelle attoseconde. Les retombées de toutes ces expériences pionnières pour le laboratoire ont été remarquables:

- Importante impulsion au démarrage l'activité « spin-off » de l'entité Sourcelab, à travers l'obtention de financements complémentaires pour réaliser les premiers démonstrateurs commerciaux (prix ERC – Proof of Concept, prix OSEO Emergence, RTRA - Triangle de la Physique).

- Implication dans l'Équipement d'Excellence ATTOLAB dédié aux études de dynamiques électroniques ultrarapides au sein de la matière. Le rôle du LOA est de construire une plateforme d'interaction laser-plasma kHz unique ouverte aux utilisateurs externes pour étudier la dynamique plasma attoseconde. Celle-ci sera implantée dans le nouvel environnement expérimental du Bâtiment P du LOA sur la période 2014-2015.

- Financement par la région Ile-de-France du projet SESAME « ATTOLITE - Sources de lumière pour la physique attoseconde » pour doter la plateforme ATTOLAB de pilotes lasers compétitifs pour la science attoseconde. En particulier, le rôle du LOA sera de dével-

opper la prochaine génération de lasers de classe TW à forte récurrence stabilisés en CEP (jusqu'à 100mJ, < 20fs et 50mJ, < 5fs à 1kHz). afin de pouvoir étudier et valoriser des nouveaux concepts de sources secondaires à partir de l'interaction laser-plasma relativiste.

- Création d'un laboratoire commun de R&D laser avec Thales Optronique SA (prévue début 2014).

- Participation au projet européen ERC Starting Grant « FEMTOELEC » de l'équipe AP-PLI du LOA, dédié au développement de sources innovantes d'électrons laser-plasma femtosecondes pour étudier la dynamique structurelle ultra-rapide par diffraction d'électrons. Ce programme de recherche sera effectué avec la nouvelle chaîne laser en Salle Noire (premiers tirs prévus fin 2013) et sera intégré à la plateforme d'interaction laser-plasma ATTOLAB dans le Bâtiment P du LOA à partir de 2015.

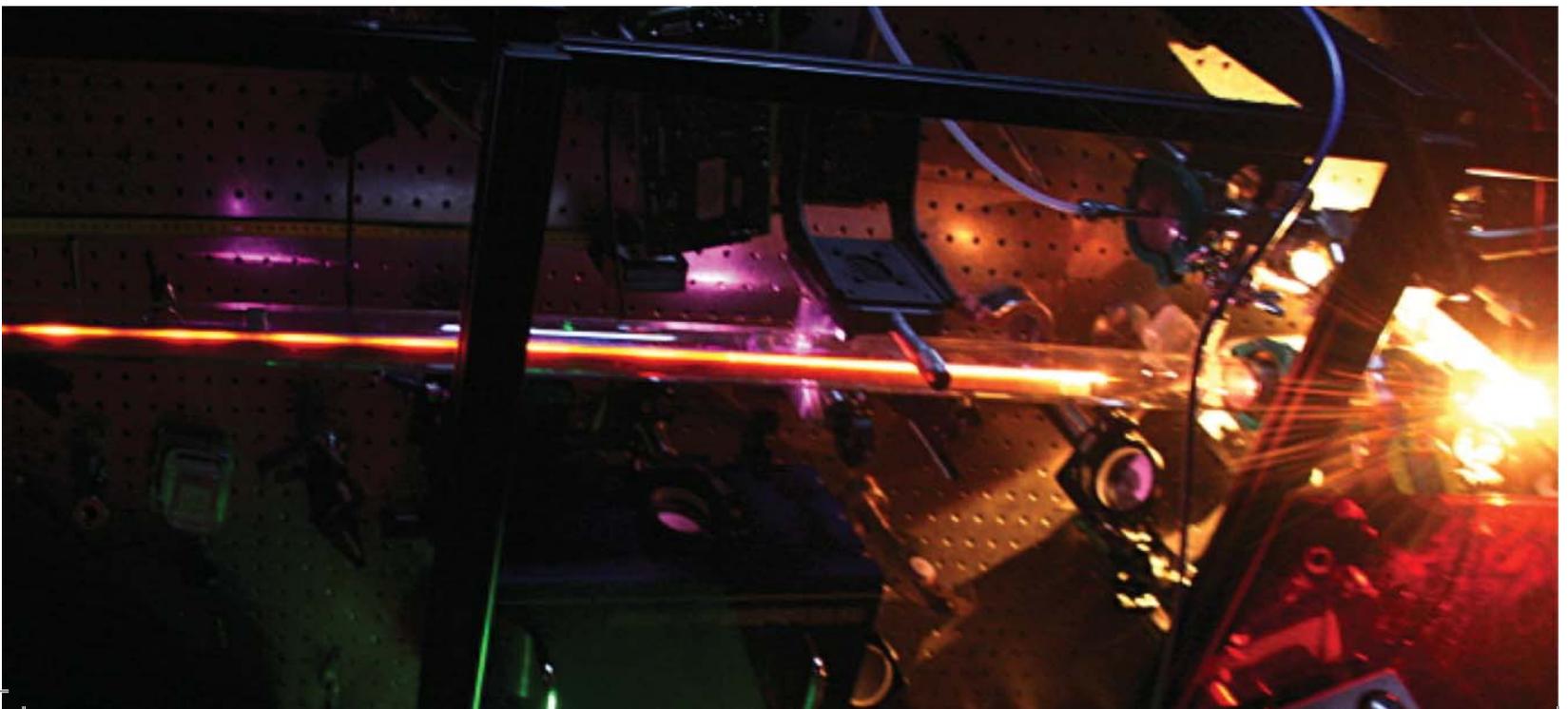
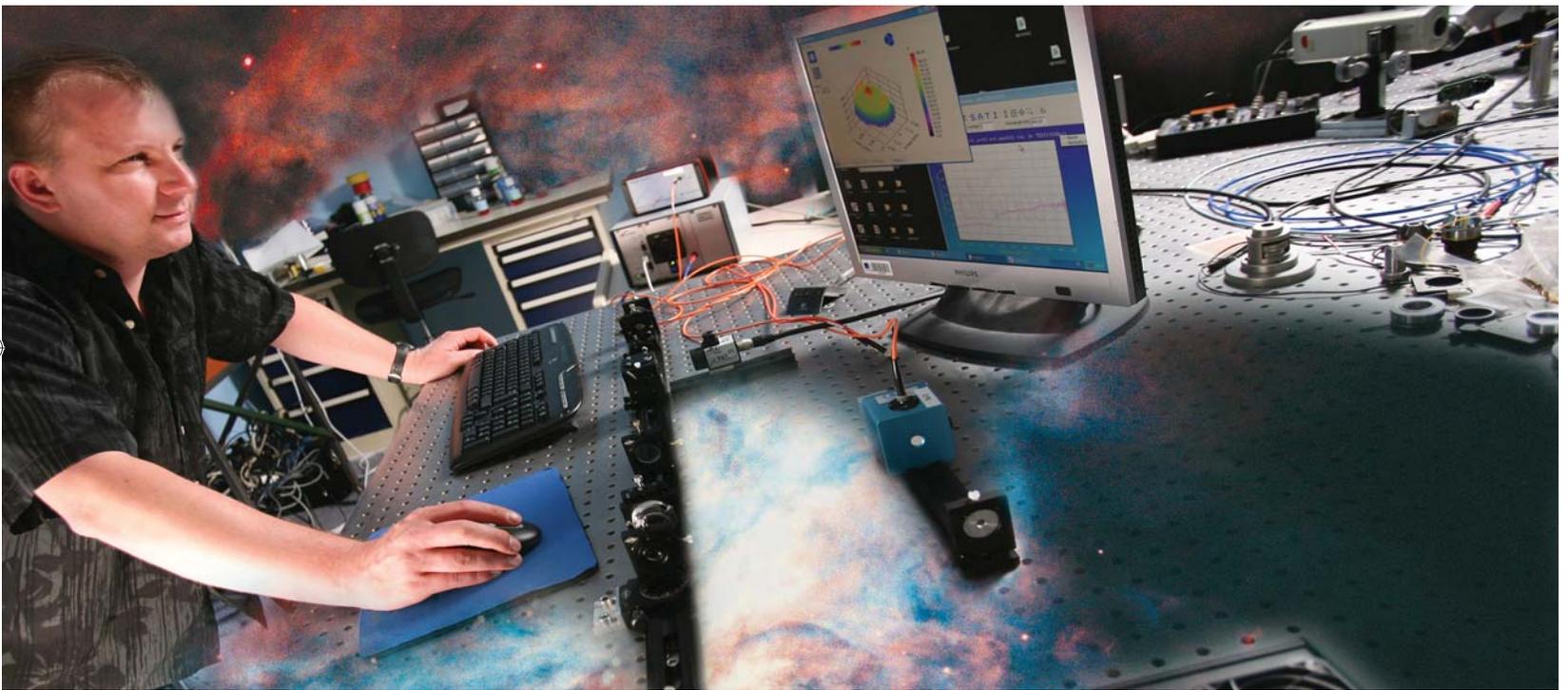
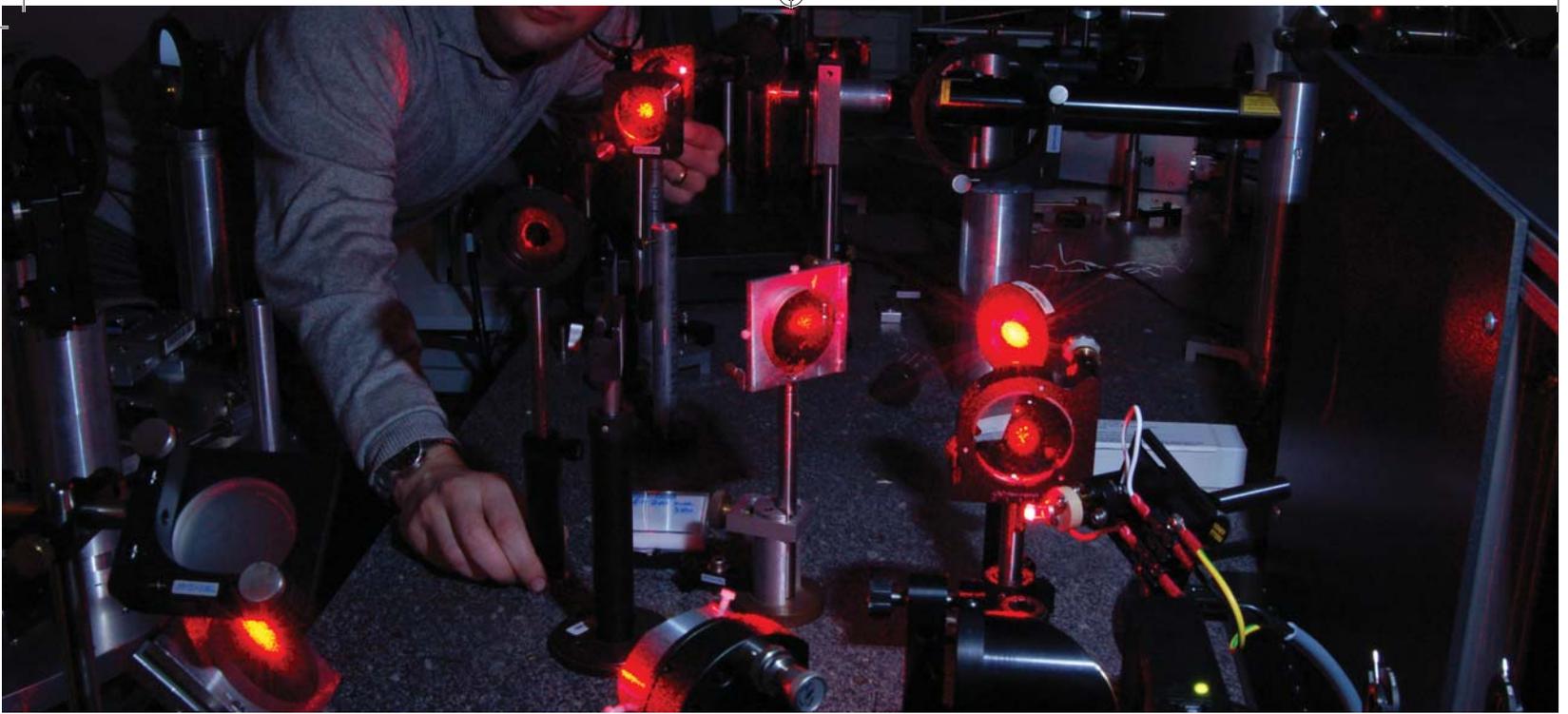
J.A. Wheeler et al, Nature Photonics 6, 829-833 (2012).

A. Borot et al, Nature Physics 8, 416-421 (2012).

M. Veltcheva et al, Physical Review Letters 108, 075004 (2012)

X.W. Chen et al, Optics Letters 34, 1588-1590 (2009)

A. Borot et al, Optics Letters 36, 1461-1463 (2011)



Avancées scientifiques - Groupe OPS

Optique-Photonique-Santé

Le groupe OPS travaille dans le domaine de la chirurgie oculaire assistée par laser à impulsions ultra-rapides, l'optique des tissus concernés et le développement de sources lasers adaptées.

Le potentiel des lasers à impulsions ultra-rapides pour l'ophtalmologie a été découvert au cours des années 1990 et c'était au début des années 2000 que les premiers systèmes cliniques sont devenus disponibles. Ces lasers ont connu un énorme succès médical et économique ; ils sont désormais couramment utilisés pour la chirurgie réfractive. Certains modèles proposent également des routines pour la greffe de cornée et récemment plusieurs systèmes ont été proposés pour la chirurgie de la cataracte. Nos activités de recherche ont débuté en 2002 par une collaboration avec l'hôpital Hôtel-Dieu de Paris. Nos premières expériences menées sur des cornées fournies par la Banque Française des Yeux ont révélé que la transparence des cornées – et donc le succès de la procédure laser – dépend très fortement de l'état de la cornée sous traitement : la présence d'œdèmes ou d'autres pathologies compromet fortement la qualité du faisceau laser et donc le résultat chirurgical. Nous avons déterminé la relation entre les propriétés du tissu, étudié l'interaction laser-tissu, identifié d'éventuels effets secondaires et – en tenant compte des résultats obtenus – proposé des solutions optimisées. Grâce à un système de détection par seconde harmonique (émission optique non-linéaire) pour quantifier l'atténuation du faisceau laser dans le tissu, nous avons mesuré la profondeur de pénétration du laser dans des cornées claires et œdémateuses, mis en évidence des effets non-linéaires secondaires et identifié les conditions pour les minimiser, et quantifié l'influence des aberrations optiques et de l'ouverture numérique des optiques de focalisation.

Le projet ANR GRECO

Ces études ont permis de constater que la technologie actuelle permettait l'utilisation des lasers à impulsions ultra-brèves dans le contexte de la chirurgie réfractive avec d'excellents résultats, mais leur pertinence reste très limitée pour la chirurgie sur des tissus optiquement diffusants : la cornée œdémateuse, la sclère et le cristallin atteint d'une cataracte. Nous avons fixé comme premier objectif de proposer une solution technologique pour la greffe de cornée, opération fréquente mais difficile à effectuer manuellement: un système laser optimisé en longueur d'onde afin d'assurer une bonne pénétration dans les tissus. Ce système

laser présenterait les avantages de compacité, de robustesse et d'économie. L'objectif du projet était de lever les verrous technologiques en concevant et mettant en place un dispositif démonstrateur basé sur un laser fibré compact travaillant dans la fenêtre de transparence optique tissulaire centrée à $1,65 \mu\text{m}$ que nous avons préalablement identifiée et comprenant un système de correction du front d'onde optimisant la qualité du faisceau laser. En parallèle, nous avons effectué une série d'expériences de laboratoire visant à étudier l'optique des tissus et l'interaction laser-tissu.

Au cours du projet nous avons obtenu les résultats suivants:

- mise en place d'une source flexible basée sur le principe de l'amplification paramétrique optique (OPA, Optical Parametric Amplification) utilisant une combinaison de deux cristaux non-linéaires.
- mise en évidence de l'avantage de l'utilisation de la longueur d'onde modifiée pour la chirurgie de la cornée : la profondeur de travail a été améliorée d'un facteur supérieur à 3 sans apparition d'effets secondaires thermiques, mécaniques ou autres.
- mise en place d'un ensemble de dispositifs permettant l'étude détaillée de l'optique des tissus. Nous avons déposé un brevet pour un de ces dispositifs dont la valorisation a fait l'objet d'un projet ASTRE financé par le Conseil général de l'Essonne.
- conception avec le laboratoire du LCFIO d'un laser fibré compact émettant à une longueur d'onde de $1,6 \mu\text{m}$ qui est actuellement sans concurrence.
- mise en place un dispositif démonstrateur

réunissant les composants développés.

Le projet ANR NOUGAT

Le projet NOUGAT (Nouvel OUtil pour la chirurgie du Glaucome Assistée par laser femtoseconde et Tomographie par cohérence optique) vise l'opération du glaucome. Le glaucome est une maladie oculaire associée à une pression intraoculaire élevée. Il est la deuxième cause de cécité sur le plan mondial. Les traitements chirurgicaux classiques visent à créer des canaux filtrants dans la sclère pour abaisser la pression. Souvent, les résultats ne sont que temporaires en raison de réactions de cicatrisation dans le tissu. Les interventions chirurgicales sont relativement lourdes et ne peuvent pas ou peu être répétées. L'utilisation de lasers à impulsions ultrarapides pourrait contourner ce problème car l'interaction laser-tissu demeure très localisée et l'intervention pourra donc très probablement être effectuée sans déclencher des processus de cicatrisation. Néanmoins, le laser doit être capable de pénétrer dans la sclère qui est optiquement très diffusante. L'opération du glaucome nécessite un système laser aux impulsions plus énergétiques ainsi qu'un dispositif d'imagerie in situ.

L'objectif est la conception et la mise en place d'un démonstrateur basé sur une source compacte et optimisée en longueur d'onde avec un système de tomographie par cohérence optique pour visualiser l'intervention chirurgicale. Nous avons obtenu les résultats suivants :

- Une source laser basée sur le principe de la génération paramétrique optique (OPG – Optic Parametric Generation) a été mise en



place au LOA émettant quelques dizaines de microjoules à des longueurs d'ondes accordables sur une large gamme spectrale. Ceci représente une amélioration d'un facteur d'au moins cent par rapport à l'état de l'art et pourra faire l'objet d'un projet de valorisation par Amplitude Systèmes.

- Des expériences sur tissu ont démontré que des découpes précises et propres sont possibles sur toute l'épaisseur de la sclère.
- Un système commercial d'imagerie par cohérence optique (OCT) a été adapté et en parallèle un système optimisé pour notre dispositif a été conçu et développé au LCFIO.

Les projets sur l'optique des tissus du segment antérieur de l'œil

L'optique des tissus en considération dépend fortement de leur microstructure. La cornée et la sclère sont constituées de fibrilles de collagène immergées dans un liquide interstitiel. L'organisation spatiale de ces fibrilles

détermine les propriétés macroscopiques des tissus de façon très subtile et non entièrement comprise. Dans le cas de la cornée, l'endothélium, une couche monocellulaire postérieure régule son hydratation et assure sa transparence. En cas de mauvais fonctionnement endothélial – qui représente une des indications de greffe – cette régulation est perturbée et la cornée devient œdémateuse.

Le projet DISCO (Développement d'un Dispositif industriel pour la Caractérisation Optique de greffons de cornée) est financé par le programme ASTRE du Conseil général du département de l'Essonne, ainsi que la Direction des relations Industrielles et des Partenariats (DRIP) suite à un dépôt de projet conjoint avec deux de nos partenaires : la Banque Française des Yeux (BFY, Paris) et la société Imagine Eyes. Grâce au système de mesure de transparence de cornées (brevet obtenu dans le cadre du projet GRECO), nous avons pu démontrer expérimentale-

ment que notre approche permet de classer des greffons de cornée en fonction de leur transparence de façon systématique et reproductible.

La Fondation de l'Avenir pour la recherche médicale a financé un second projet qui visait à développer une méthode in vivo pour la mesure de la transparence cornéenne. Notre approche utilise une simple lampe à fente, un biomicroscope qui est le moyen de diagnostic standard en ophtalmologie. Un traitement informatique des images obtenues in situ permet de calculer un paramètre de qualité et de classer les cornées de façon reproductible en fonction de leur transparence.

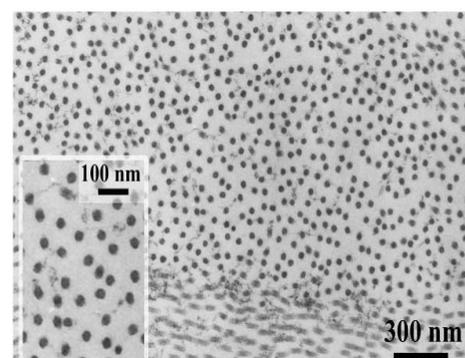
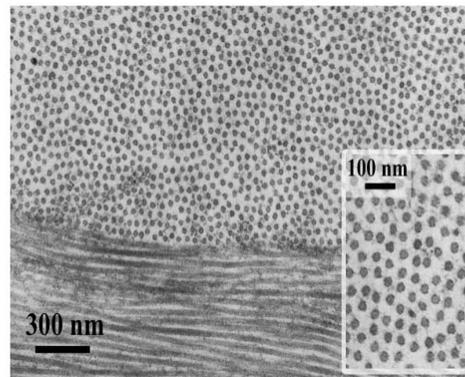
En collaboration avec l'université Paris Descartes, nous avons monté un dispositif d'holographie numérique qui permet la

mesure du front d'onde en amplitude et en phase après avoir traversé le tissu cornéen. Nous pouvons ainsi étudier et quantifier l'influence de la diffusion de la lumière sur l'acuité visuelle du patient. Ces mesures ont été complétées par des mesures de diffusion effectuées en collaboration avec une équipe de l'Institut Fresnel à Marseille et à l'Institute of Electronic Structure and Lasers à Héraklion en Grèce où un dispositif d'holographie numérique pour étudier les propriétés de propagation d'impulsions lasers intenses a été utilisé.

Les études de microscopie multimodale de la cornée

L'approfondissement de nos recherches sur l'optique des tissus du segment antérieur de

Structures de cornées saine et oedémateuse.



l'œil nous a amené à nous intéresser aux méthodes modernes de microscopie optique applicables à ces tissus. Nous avons lancé une collaboration avec une équipe du Laboratoire d'Optique et Biosciences (LOB) qui est spécialisée dans le domaine de la microscopie non-linéaire basée sur l'utilisation de plusieurs modalités par excitation multiphotonique et détection de seconde et troisième harmonique.

C. Crotti et al, Invest. Ophthalmol. Vis. Science. Invest Ophthalmol Vis Sci. 54, 340-3349, 2013.

L. Kowalczyk et al, Translational Vision Science & Technology 2(2), 2013

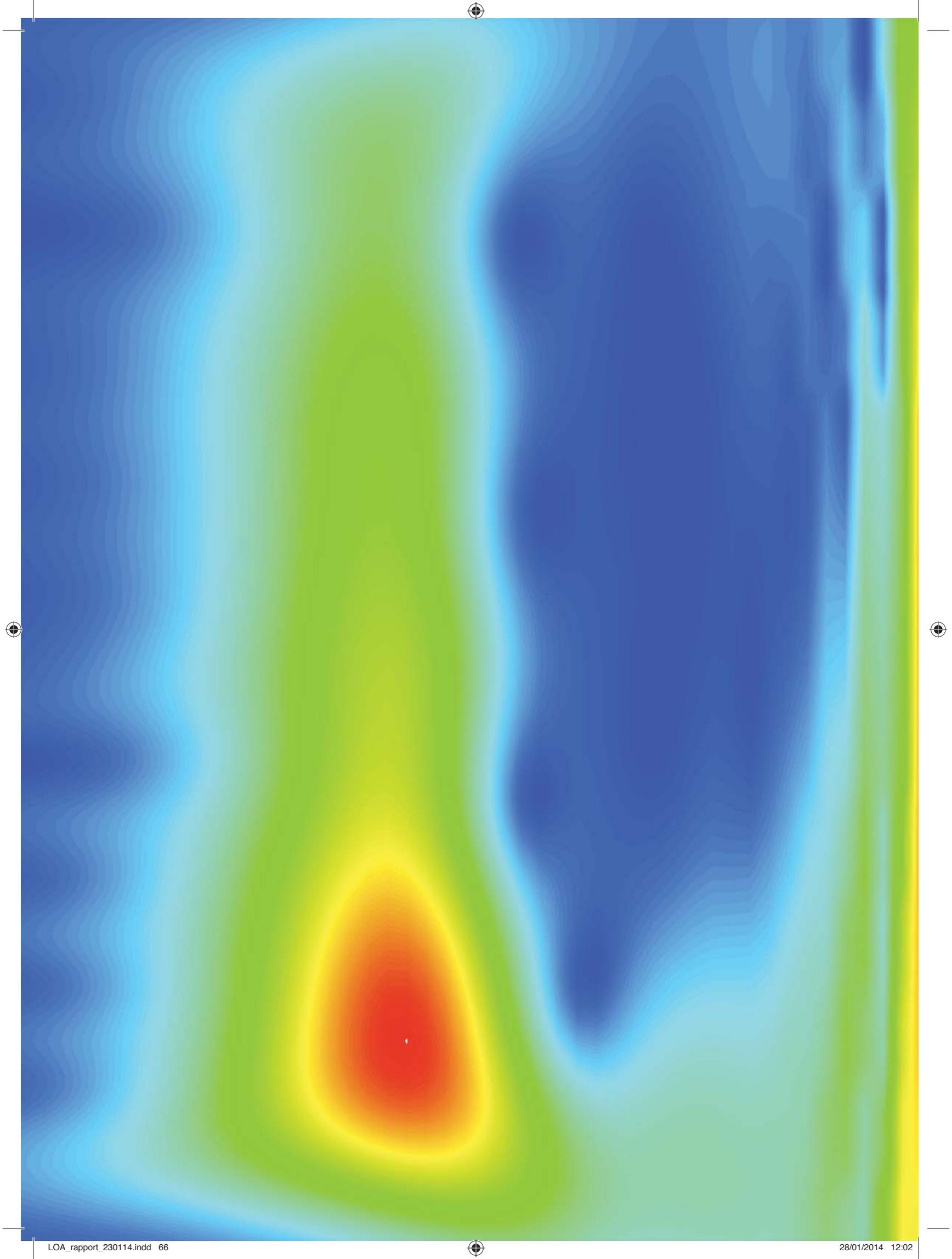
K. Plamann et al, J. Opt. 12, 084002, 2010.

D.A. Peyrot et al, J. Refr. Surg. 26 (10), 786-795, 2010.

V. Nuzzo et al, Cornea. 28 (8) 908-913, 2009.

Nous avons ensuite monté le projet HACOR (Imagerie structurale de la cornée par génération de second harmonique optique), commun au LOA et au LOB qui a été retenu par le Triangle de la Physique. Le projet visait à étudier plusieurs phénomènes optiques mis en évidence par imagerie par seconde harmonique et leur comparaison avec nos observations en optique linéaire. Ce projet a été initié par l'observation fortuite d'anomalies structurales dans les cornées de rats diabétiques par microscopie de réflectance confocale. Dans ce tissu, la technique d'imagerie bi-photonique développée au LOB permet d'observer la fluorescence excitée à deux photons des cellules et la génération de seconde harmonique (SHG) des fibrilles de

collagène. Elle permet ainsi d'accéder à des informations complémentaires à celles obtenues par les techniques classiques utilisées en ophtalmologie.



Avancées scientifiques - Groupe APPLI

Applications des sources ultrabrèves à la physique du solide

En Janvier 2013, nous avons créé au laboratoire un nouveau groupe : APPLI (Application des sources ultra-brèves à la physique des solides). Les missions de ce groupe sont doubles :

- exploiter les sources ultra-brèves développées au Laboratoire pour étudier la dynamique ultra-rapide dans les solides. Cela nécessite la mise en place de systèmes et techniques expérimentales du type pompe-sonde.
- continuer le développement de sources ultra-brèves adaptées aux expériences pompe-sonde sur les solides. En particulier, des sources orientées vers la haute cadence.

L'objectif est de créer une masse critique de physiciens qui s'intéressent aux problèmes de la physique ultra-rapide dans la matière condensée.

Nous utilisons différentes techniques expérimentales:

- la pompe-sonde optique qui permet de sonder l'évolution de la réflectivité d'un matériau à l'échelle sub-100 fs. Cette technique, relativement facile à mettre en œuvre avec les lasers femtosecondes du laboratoire, est puissante car elle donne accès rapidement au comportement dynamique d'un matériau. C'est donc la première étape nécessaire à une étude dynamique. L'interprétation peut néanmoins s'avérer délicate car on a accès ici à des informations macroscopiques à travers l'observable réflectivité. Des techniques expérimentales plus sophistiquées sont alors nécessaires pour développer une approche plus microscopique.
- la diffusion magnétique résonante aux petits angles (magSAX) résolue en temps. Cette technique utilise le rayonnement X ou XUV et permet d'obtenir des informations sur la dynamique d'aimantation d'un matériau composé de domaines magnétiques nanométriques.
- la photoémission résolue en temps. Cette technique utilise du rayonnement UV femtoseconde et l'effet photoélectrique pour sonder la dynamique de la structure électronique en fonction du temps. En particulier, elle permet de visualiser directement le diagramme des bandes électroniques dans l'espace réciproque. Ici aussi, on a donc accès à une vision microscopique.

Les expériences pompe-sonde optique

L'activité est centrée autour de l'utilisation de lasers femtosecondes dans le but d'étudier la dynamique de réseaux, de phonons, d'électrons ainsi que de leurs interactions au sein d'un cristal.

La période caractéristique de vibration du réseau dans un cristal étant de l'ordre de 10 à 100 fs, une résolution temporelle femtoseconde est donc nécessaire pour suivre l'évolution et le comportement temporel des phonons ainsi que la dynamique d'interaction électron-phonon, qui a lieu sur des échelles de temps de l'ordre de la picoseconde. Ces études peuvent ouvrir la voie à la compréhension des processus élémentaires qui sont à la base de nombreux processus réactionnels.

Nous avons plus particulièrement étudié les matériaux fortement corrélés qui sont très attractifs pour des expériences de dynamique ultrarapide. Tous les degrés de liberté du cristal : le spin, les électrons, les phonons, sont fortement couplés et produisent un diagramme de phase à la fois complexe et intrigant. Dans ces matériaux, l'excitation laser produit des phases métastables qui sont absentes dans le diagramme de phase à l'équilibre. On peut donc modifier les propriétés physiques d'un cristal par l'excitation laser.

- le V_2O_3 : nous avons mis en évidence les voies de relaxation électronique ainsi que le comportement singulier du mode de vibration A_{1g} . Nous avons montré un durcissement de ce mode de vibration, qui indique que l'impulsion laser excite les électrons vers

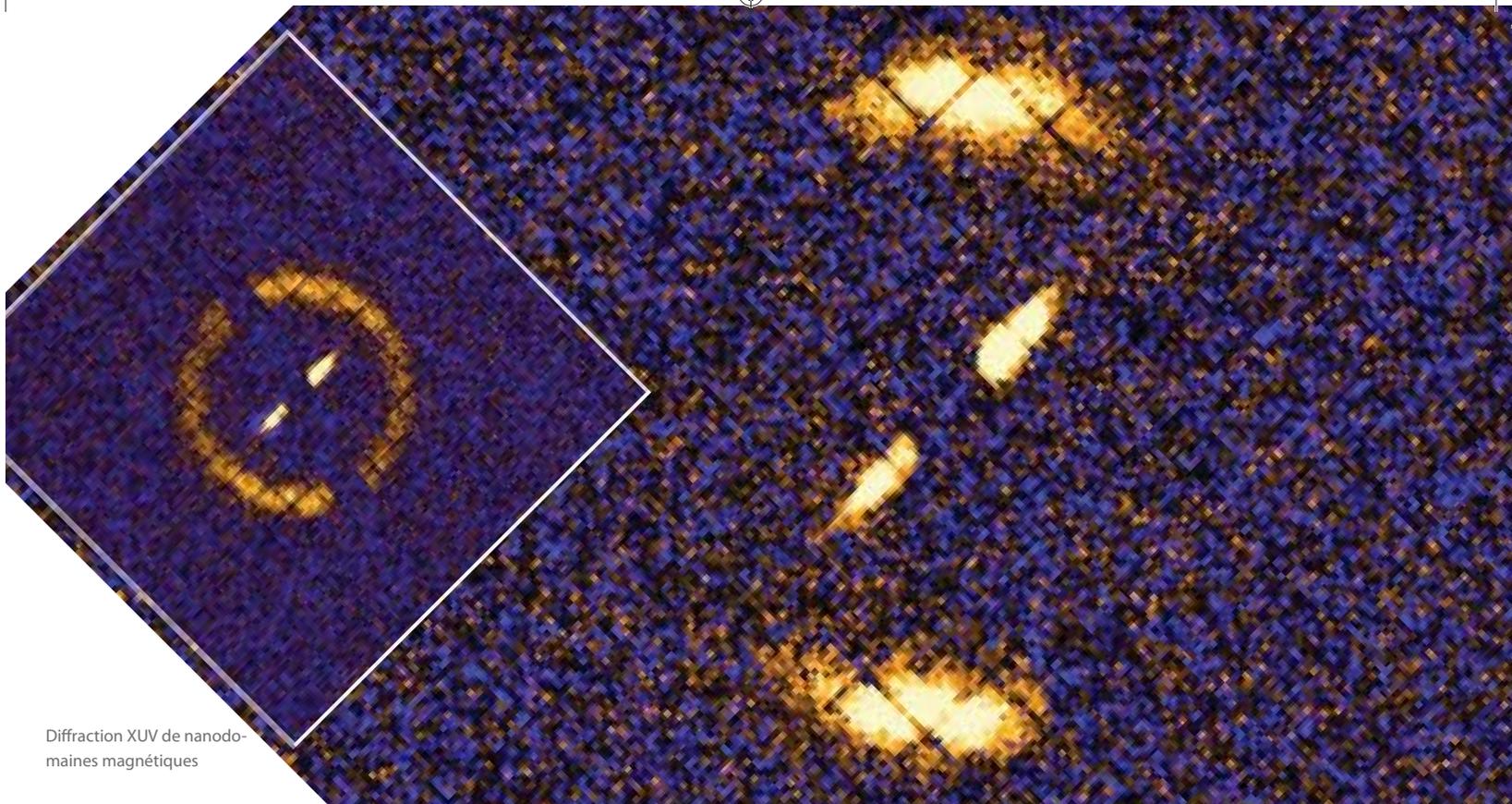
des états liants, contrairement à ce qui se passe habituellement dans les autres matériaux.

- les pnictides supraconducteurs : nous avons mis en évidence le couplage sélectif des électrons photoexcités avec seulement une partie du bain de phonons. Nos résultats suggèrent que le phonon n'est pas responsable de la formation des paires de Cooper, et montrent que la théorie BCS n'est pas applicable à cette classe de supraconducteurs.

Plus récemment, nous avons développé une expérience dédiée aux nanostructures. Nous avons étudié la dynamique de phonon cohérent dans la graphène, en collaboration avec la Columbia University de New York, ainsi que la dynamique de couplage électron-phonon dans le cas d'un isolant topologique. En particulier, nous avons mesuré le mode de cisaillement dans la bicouche de graphène, qui représente un seul oscillateur harmonique. Cette étude a permis de mettre en évidence pour la première fois un effet de relaxation structurale du graphène en fonction du nombre de plans atomiques, ainsi que l'influence des conditions extérieures sur la dynamique de vibration, comme les adsorbats et différents substrats.

La désaimantation ultrarapide

Nous avons démontré la possibilité de contrôler la polarisation sur une source harmonique HHG et nous avons développé une expérience pompe infrarouge IR – sonde HHG basée sur la diffusion magnétique résonnante aux petits angles (magSAXS) pour



Diffraction XUV de nanodomaines magnétiques

étudier la désaimantation ultra-rapide dans un réseau de domaines magnétiques nanométriques.

L'enregistrement de diagrammes de diffusion, à différents délais entre la pompe IR et la sonde harmonique, a montré l'absence de toute modification de la structure des domaines magnétiques (dans la limite de la description statistique de la magSAXS). En regardant plus en détail, on observe cependant un temps de désaimantation nettement plus court ($\tau_{th} \approx 100$ fs) que ceux observés pour des fluences de pompe similaire sur des matériaux du même type (à base de Co) présentant un macro-domaine unique (jusqu'à $\tau_{th} \approx 250$ fs). Ce constat, ainsi que l'absence observée d'une dépendance à la fluence de la vitesse de désaimantation, peut s'expliquer par le transfert de moment angulaire de spin entre domaines voisins du aux mouvements des électrons chauds.

Cette interprétation est également étayée par les résultats que nous avons obtenus ré-

cemment en collaboration avec les groupes du laboratoire LCPMR, de U Berlin et de U. de Hambourg au XFEL FLASH.

L'imagerie mono-tir femtoseconde de domaines magnétiques

L'enregistrement d'images successives à l'échelle femtoseconde témoigne directement de l'évolution de la structure des domaines magnétiques dans l'espace et le temps. Nous avons obtenu une image statique de domaines magnétiques avec une résolution spatiale inférieure à 100 nm à partir d'une seule impulsion X de 70 fs. Cette expérience a été réalisée sur le XFEL LCLS à Stanford, en utilisant la technique d'holographie à transformée de Fourier.

La photoémission résolue en temps sur le site du synchrotron SOLEIL.

Cette expérience, baptisée FemtoARPES, a pour but de mesurer les états électron-

iques dans la matière condensée hors équilibre. Cela est réalisé expérimentalement en mettant en œuvre un diagnostic de photoémission d'électrons résolue angulairement et temporellement. L'observation des processus de relaxation est réalisée à l'aide d'un second faisceau laser ultraviolet (sonde) qui provoque la photoémission des électrons, analysés ensuite par spectroscopie haute résolution des photoélectrons (Angle Resolved PhotoElectron Spectroscopy, ARPES). La grande force de cette technique réside dans le fait qu'elle permet d'observer directement la structure électronique (la structure de bandes) et donc d'obtenir une vision microscopique des phénomènes dans l'espace réciproque.

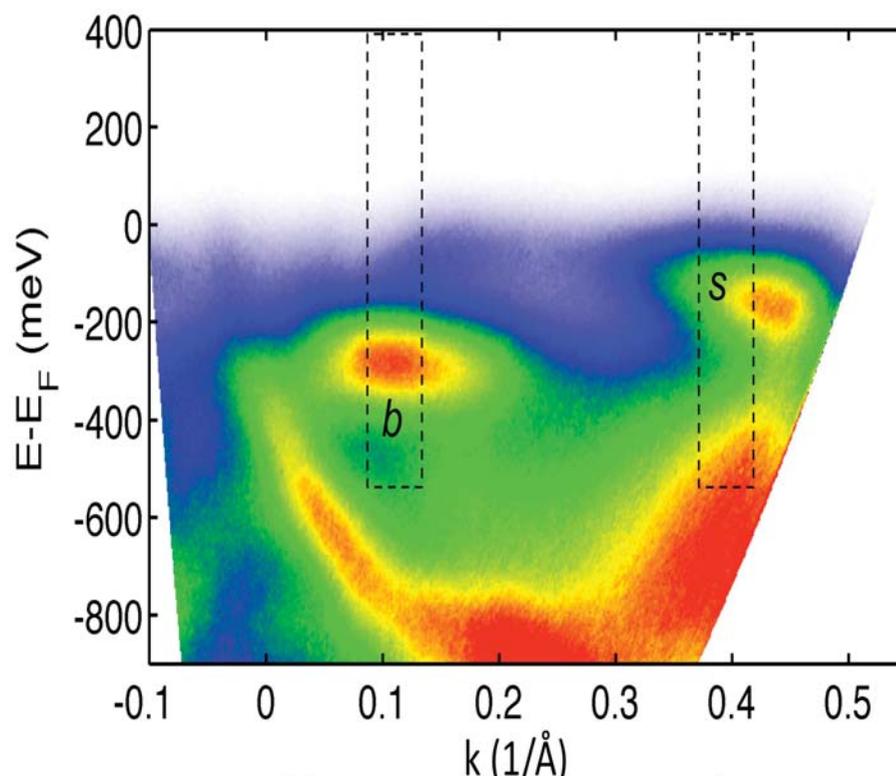
Cette expérience représente l'état de l'art dans le domaine de la photoémission résolue en temps. A notre connaissance, c'était

également la première fois qu'une source à 6.3 eV, présentant une durée d'environ 60 fs était générée à un taux de répétition si élevé.

L'étude du Bismuth montre que l'état de bulk subit une oscillation à 2.9 THz correspondant au mode de phonon A_{1g} . En revanche, l'état de surface n'est pas soumis à une telle oscillation. Ces très beaux résultats nous permettent de voir directement l'effet d'une photoexcitation : apparition d'états excités au dessus du niveau de Fermi après photoexcitation; puis relaxation de l'énergie électronique sur une échelle de temps picoseconde due au couplage électron-phonon.

L'analyse de l'amplitude des oscillations de la bande b en fonction du vecteur d'onde électronique nous a permis pour la première fois d'observer la dépendance en vecteur d'onde du couplage d'états électroniques

Observation de la structure de bandes par la technique de photoémission électronique résolue en temps (FemtoARPES).



individuels avec un mode de phonon donné. Ces résultats ont une portée générale car la plupart des matériaux sont concernés par ce couplage électron-phonon anisotrope. Dans certains cas, il permet d'expliquer des phénomènes remarquables comme la haute température critique ($T_c=39K$) dans le supraconducteur MgB_2 ou bien l'état onde de densité de charge dans TaS_2 .

Le projet ERC FEMTOELEC

Le projet FEMTOELEC, qui a commencé en janvier 2013, a pour objectif de développer une technique qui n'est pas utilisée en France : la diffraction d'électrons résolue en temps. Actuellement, les sources d'électrons « classiques » sont basées sur l'accélération d'électrons dans un champ statique jusqu'à des énergies de l'ordre de 100 keV. Les électrons sont émis par effet photoélectrique sur une photocathode excitée par un laser ultrabref. Des progrès importants ont été réalisés dans les dix dernières années mais les performances atteignent maintenant leurs limites :

- des résolutions de 300-500 fs limitées par la charge d'espace du paquet.
- cette même charge d'espace limite le nombre d'électrons dans le paquet à quelques milliers ce qui est très faible et rend difficile l'étude de phénomènes irréversibles.

Dans ce contexte, on peut dire qu'il n'existe toujours pas de source d'électrons permettant de sonder la matière avec une résolution sub-100 fs. Nous proposons ainsi de développer une source d'électrons innovante qui

permettra de dépasser ces limites. Pour cela, nous utiliserons l'interaction laser-plasma à haute intensité.

Des lois d'échelle ont été établies et nous montrent que l'on peut envisager la production d'électrons au MeV avec un laser de quelques millijoules et de très courtes durées : 5 fs, soit quelques cycles optiques. Un tel laser est disponible au LOA : c'est le laser kHz de la « Salle Noire » développé par le groupe PCO.

Par ailleurs, dans le cadre de ce projet, nous construisons également une source à électrons « classique » : canon à électrons à 100 keV. La résolution sera certes limitée à quelques centaines de femtosecondes mais permettra « d'appivoiser » la technique de diffraction d'électrons et de commencer à étudier des premiers systèmes physiques.

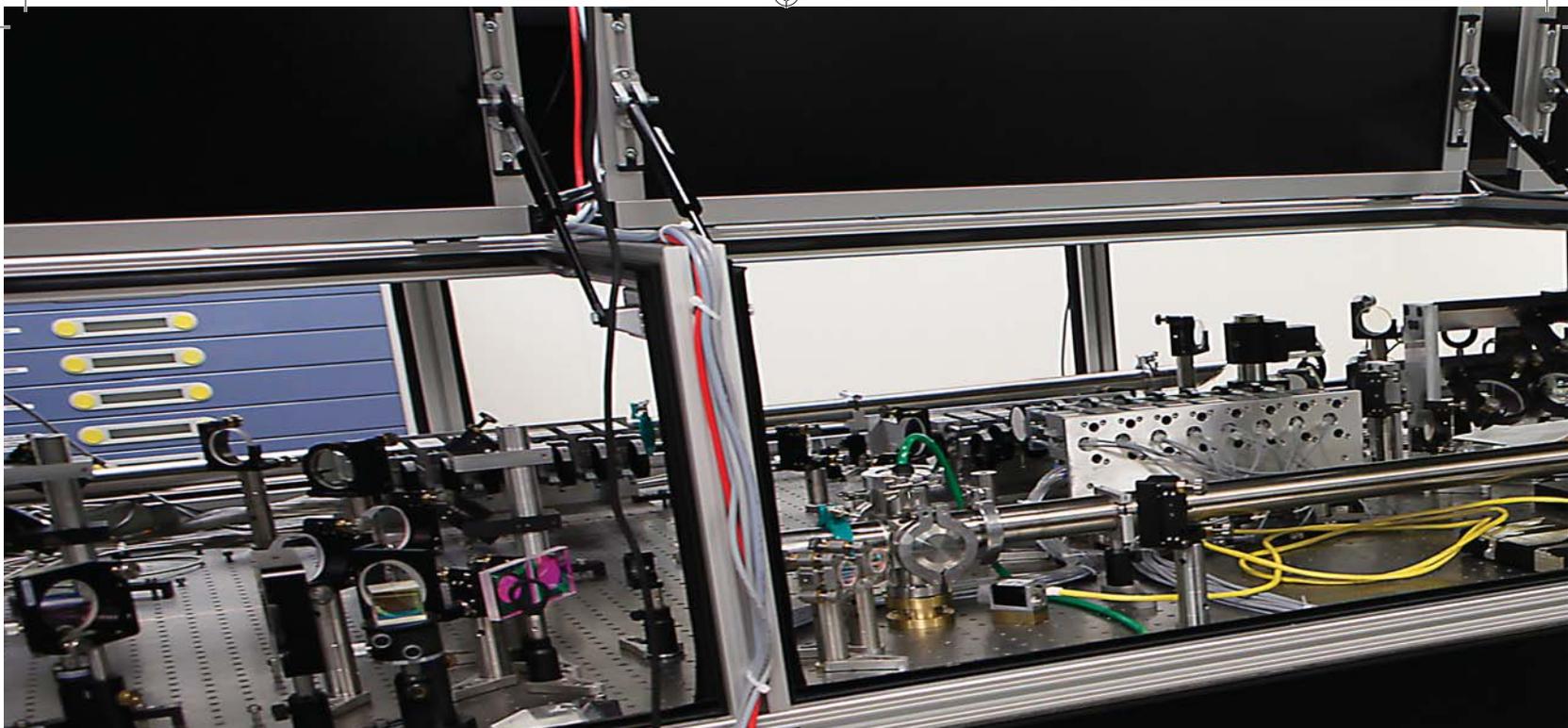
D. Boschetto et al, Physical Review Letters 100, 027404 (2008)

J. Faure et al, Phys. Rev. Lett. 109 226404 (2012)

E. Papalazarou et al, Phys. Rev. Lett. 108, 256808 (2012)

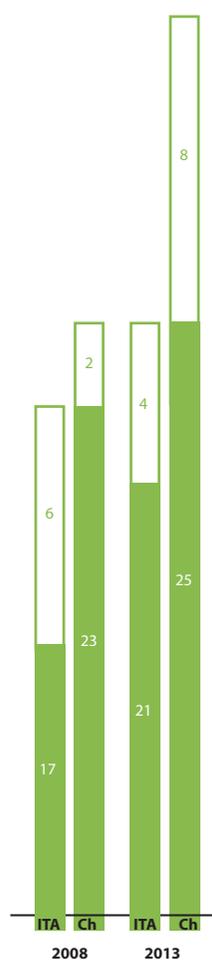
Z.-H. He et al, Appl. Phys. Lett. 102, 064104 (2013)

B. Vodungbo et al, Nat. Commun., vol. 3, p. 999, 08 2012.



Ressources humaines et formation

Le LOA: 90 personnes dont 46 permanents



Effectifs - ITA effectuant une activité de recherche comptés comme chercheurs

permanents ■
CDD

Le potentiel humain de la recherche et du soutien à la recherche a légèrement cru. Les nombres de personnels ITA et de chercheurs sont en augmentation et ont retrouvé le niveau de 2008 malgré les départs à la retraite et les départs consécutifs à la réorganisation autour du plateau de Saclay. Il y a eu 13 départs et 15 arrivées de postes permanents au LOA depuis 2008 dont 7 ITA soutien à la recherche et 8 chercheurs (incluant statut ITA ayant une activité de recherche et non de soutien). L'ensemble des départs à la retraite (x4) du personnel ITA a pu être remplacé, plus 3 créations de postes supplémentaires obtenues. Le rapport entre les personnels effectuant réellement du soutien à la recherche (gestionnaires inclus) et les personnels effectuant réellement une activité de recherche est de 0.8 (sans prise en

compte des CDD) et 0.9 (CDD compris). Les étudiants en thèse et les post-doctorants ne sont pas pris en compte dans l'effectif recherche. Si la répartition statutaire est simplement prise en compte, le rapport ITA/chercheurs est de 1.4. L'effectif du laboratoire est jeune, avec une distribution des personnels permanents centrée à 40 ans. Le rapport homme/femme est de 4.

Le LOA a été particulièrement attentif à promouvoir et valoriser l'excellence des personnels du laboratoire. Nous avons ainsi été lauréats de 5 prix en moyenne par an depuis 2008: 4 prix de thèse Ecole Polytechnique, 1 prix de thèse European Physical Society, 2 prix de thèse ParisTech, 4 Prix européen ERC, 4 Prix valorisation de la Recherche, 1 Prix Académie des Sciences, 1 Prix international



Modules d'amplificateurs de puissance su système laser Salle Jaune.

J. Dawson, 1 Prix de Thèse de l'Universidad Politécnica de Madrid, 1 Nomination à l'académie des Sciences Roumaine, 1 Prix René Pellat de la Société Française de Physique, 1 Prix de l'American Physical Society APS, 1 prix de la Fondation Dallioz, et 2 prix du magazine La Recherche.

Le personnel ITA a pu bénéficier de 3 changements de grade et 2 changements de corps, soit une promotion par an en moyenne.

25 prix

dont 12 pour des étudiants en thèse

Le passage d'Habilitation à diriger les Recherches (HDR) a été fortement encouragé. Le nombre d'HDR a doublé de 5 à 10 depuis 2008, soit en moyenne 1 nouveau diplômé par an. Enfin, les personnels ont effectué de nombreuses formations techniques afin de gagner en expertise, 170 depuis le 1er janvier 2009.

En moyenne depuis 2008, 5 thèses sont passées par an, et 15 à 20 thèses sont en cours. Plusieurs thèses sont en co-tutelle avec des partenaires internationaux, avec de très bons résultats comme par exemple le prix de la meilleure thèse 2011 de l'Université polytechnique de Madrid. Le taux d'abandon est faible. 1 abandon est à noter pour la période 2008-2013 (insertion professionnelle dans l'ingénierie instrumentale électronique). Le devenir des étudiants après leur thèse est excellent. 43 % ont un poste d'ingénieur R&D dans l'industrie en CDI. 29 % ont obtenu un poste d'Ingénieur de Recherche ou d'enseignant-chercheur dans les grands organismes (ENSTA, Ecole Polytechnique, CNRS, CEA). 25 % sont en postdoc et 7 % exercent en dehors du milieu scientifique (Finance et Événementiel). 100 % des anciens étudiants sont en activité professionnelle, dont 70% sur des postes pérennes.

Depuis 2008, nous avons accueilli 183 hommes-mois de stagiaires, soit une moy-

enne de 36,5 hommes.mois par an et une présence moyenne de 2.5 mois par stagiaire (71 personnes durant la période). Les stagiaires incluent plus particulièrement les étudiants en M2 et en formation par apprentissage. Depuis 2008, les doctorants ont effectué 227 participations aux conférences nationales ou internationales, soit une moyenne de 2 participations par an et par étudiant en thèse au laboratoire.

Les personnels du LOA sont également très actifs pour la formation académique d'étudiants. Ils contribuent à une cinquantaine d'enseignements par an dans le cadre notamment de l'ENSTA-ParisTech, l'Ecole Polytechnique et l'Université Paris-Sud. A l'ENSTA-ParisTech, nous avons la responsabilité de la filière Energie Electronucléaire

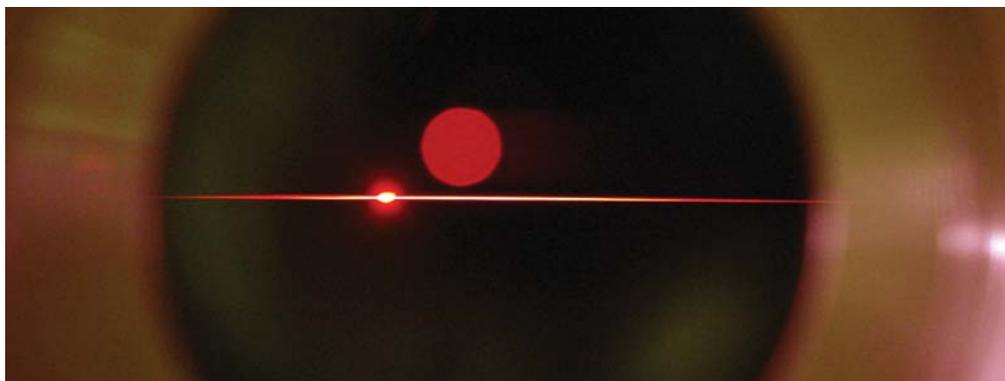
pour les élèves de 3ème année à l'ENSTA et de l'enseignement de la physique. Nous y effectuons de nombreux enseignements (physique Quantique, physique des lasers, modules électifs de deuxième année, encadrement de projets de recherche du cursus ingénieur, ...).

100 %

des diplômés de thèse en activité professionnelle active
dont 70 % en CDI

Nous participons activement à la mise en place du projet ELearning au sein de l'ENSTA ParisTech ainsi que sur le futur campus de l'Université Paris-Saclay. Plusieurs ateliers ont été mis en place par la Fondation du Campus Paris-Saclay. Le LOA anime la partie "formes individuelles et collectives du travail

Filamentation laser



Equipes LOA	% permanents au 30 juin 2013	permanents: arrivées-départs	non- permanents: arrivées-départs
ILM	8,7	1-1	13-10
PCO	15,2	4-0	13-10
SPL	13	5-1	18-13
FLEX	15,2	2-2	20-21
OPS	4,4	1-0	6-7
SG	23,9		
APPLI	6,5	3-0	3-0
LHP	10,9	2-5	10-13
FCB	2,2	0	0

des étudiants : utilisation des TIC pour le travail en groupe". De même, les premiers cours à l'ENSTA pour la physique Quantique sont en ligne.

Le LOA vient de prendre en pilotage la spécialité "Nuclear Plant Design" du Master Nuclear Energy (ce master est en partenariat avec UPSud, l'INSTN, l'Ecole Centrale et Supelec ainsi que dans Paristech, Chimie Paristech et Mines-Ponts). Nous sommes responsables pour l'UPSUD du Master National Science de la Fusion et participons au montage du nouveau Master PPF (Physique des Plasmas et de la Fusion) dans le cadre de l'Université Paris-Saclay. Ce nouveau Master sera actif à la rentrée 2015 et nous assurerons le pilotage pour l'Ecole Polytechnique.

A travers ses étudiants, le LOA a participé à l'animation doctorale nationale et internationale en assurant les fonctions de vice-présidence de l'association des doctorants XDOC de l'Ecole Polytechnique, de la présidente du Student Chapter d'Optique (SCOP). Nous avons ainsi participé à l'organisation

des JAP 2011, Journées d'Accueil des doctorants de l'Ecole Polytechnique, du Forum Recherche Optique et Nanoscience à l'attention des étudiants de Master en janvier 2012, et de la onzième conférence internationale

rapport ITA/Chercheurs
effectif statutaire **1.4**

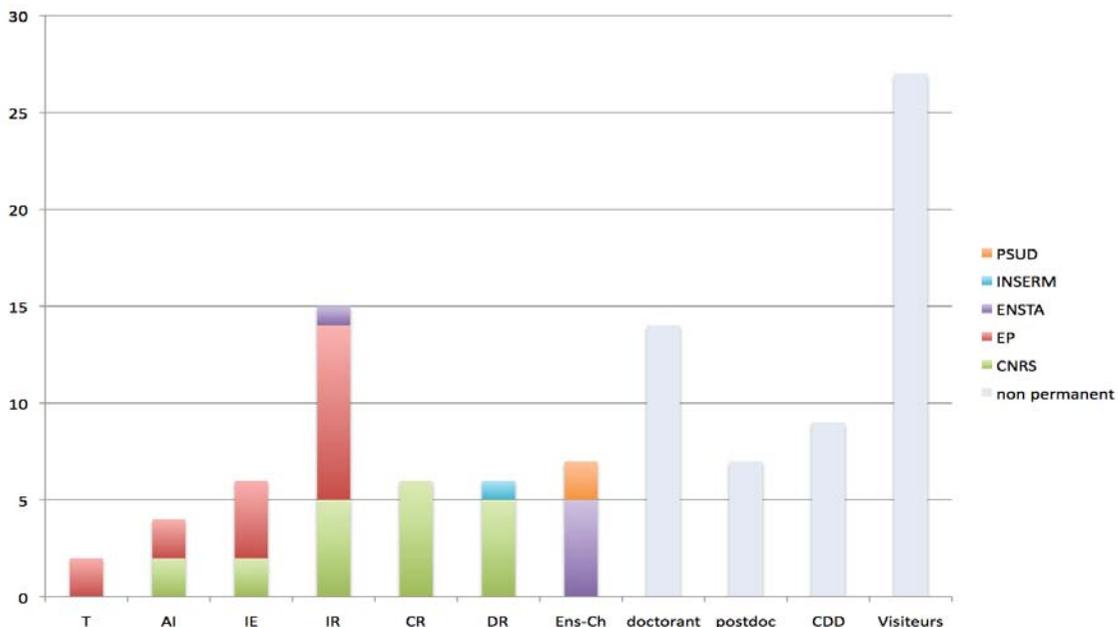
rapport ITA/Chercheurs
ITA avec activité de recherche comptés dans chercheurs **0.8**

Age moyen
personnels permanents et non-permanents **35**

taux de croissance
personnels permanents **15%**

IONS (International Network of OSA Students) en Février 2012 rassemblant des étudiants issus de nombreux Student Chapter mondiaux du domaine de l'optique et la photonique.

Répartition statutaire des personnels du LOA.





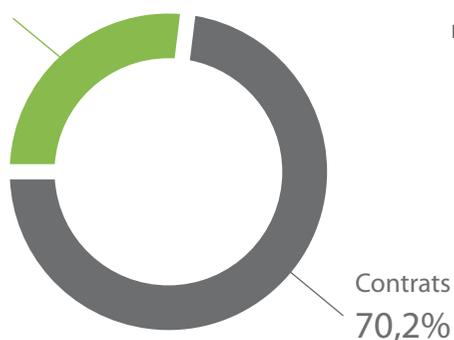
Ressources financières

Le soutien de base a été en augmentation jusqu'en 2010, puis est en baisse régulière depuis 3 ans en raison de la baisse de la subvention des ministères de tutelle. Le laboratoire a poursuivi sa forte tradition de recherche de contrats nationaux et internationaux, académiques ou sociétaux et industriels qui, couplés aux soutiens de base des tutelles, permet au LOA de disposer

d'environnements privilégiés et uniques pour mener à bien les programmes à la pointe de la recherche internationale.

L'enveloppe financière des contrats, supérieure à 2 M€/an, et l'investissement de l'ENSTA en opérations PPI (Plan pluri annuel Infrastructure) permettent de garder un budget consolidé stable. Le budget annuel consolidé du LOA est proche de 7 M€ TTC,

Soutien de base tutelles
29,8%



L'enveloppe financière sur 2008-2013 des financements issus du soutien de base des 3 tutelles cnrs, ensta et école polytechnique et des contrats est de 18,57 M€ TTC.

masse salariale
64,2%



Budget consolidé 2012 (6,7 M€ TTC). La contribution des tutelles du LOA à la masse salariale hors contrats est de 47 %.

LOA	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Soutien de base	994	1 013	1 045	887	852	738
contrats	1 501	2 046	2 508	2 215	2 181	2 585
budget consolidé	5 524	6 703	7 286	6 300	6 700	7 016
Infrastructure	275	723	709	191	0	720

k€ TTC

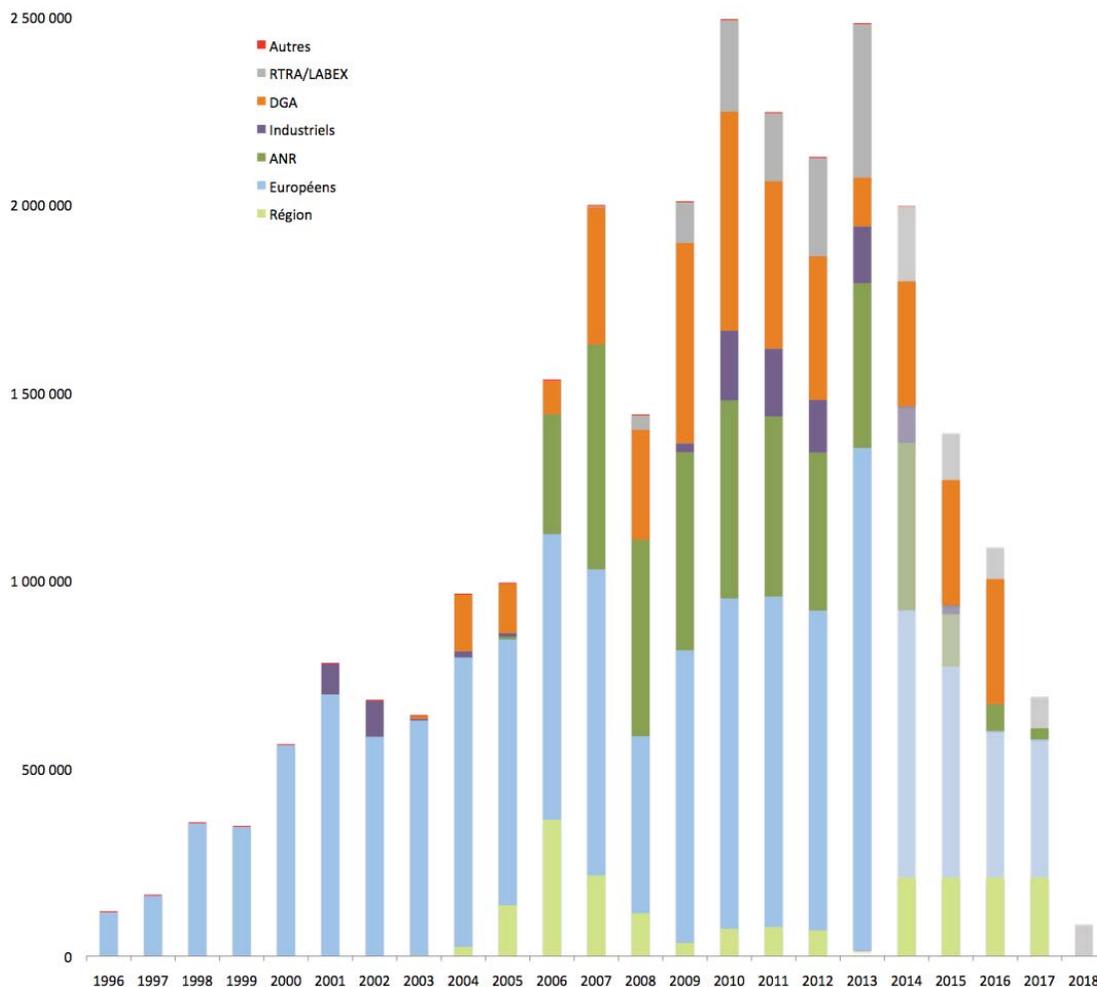
dont 47 % de masse salariale hors contrats (données 2012).

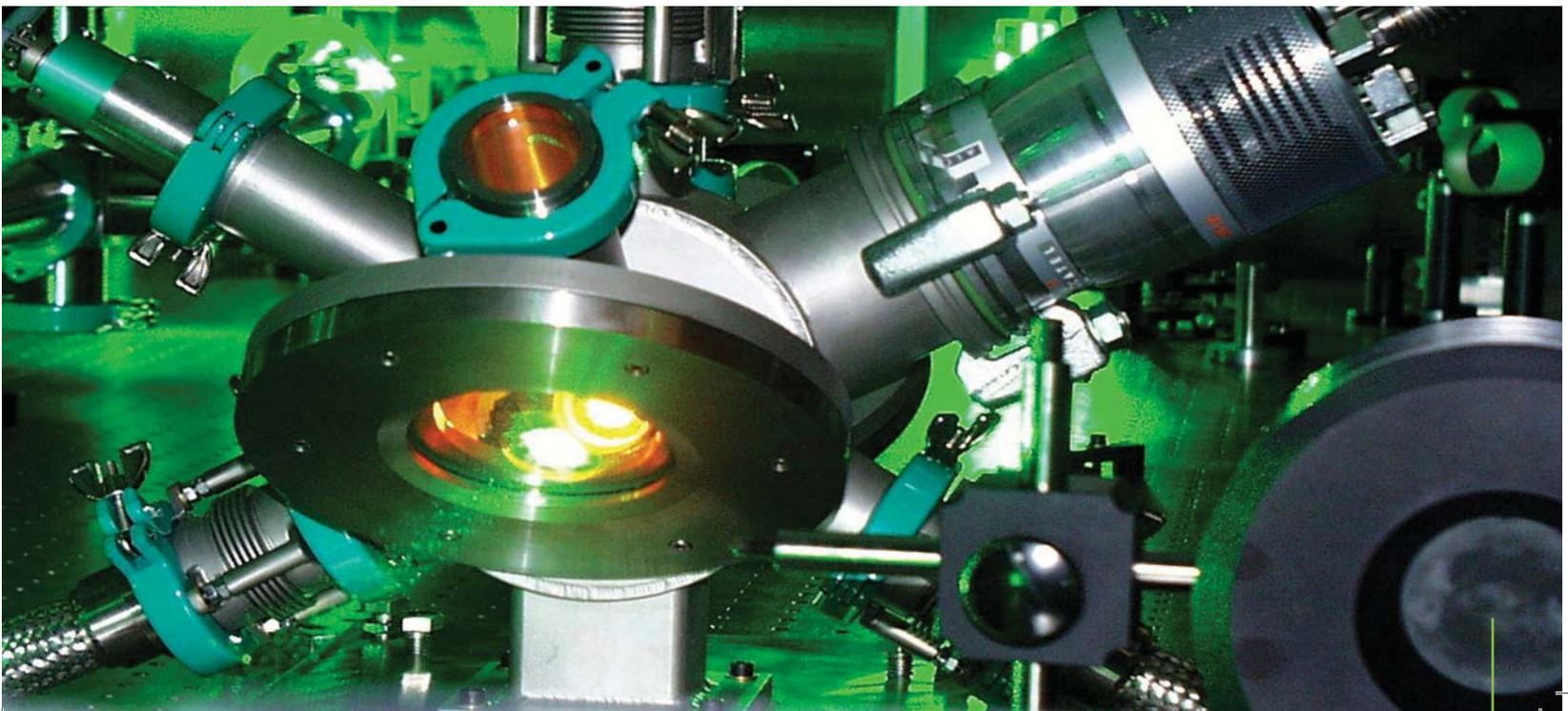
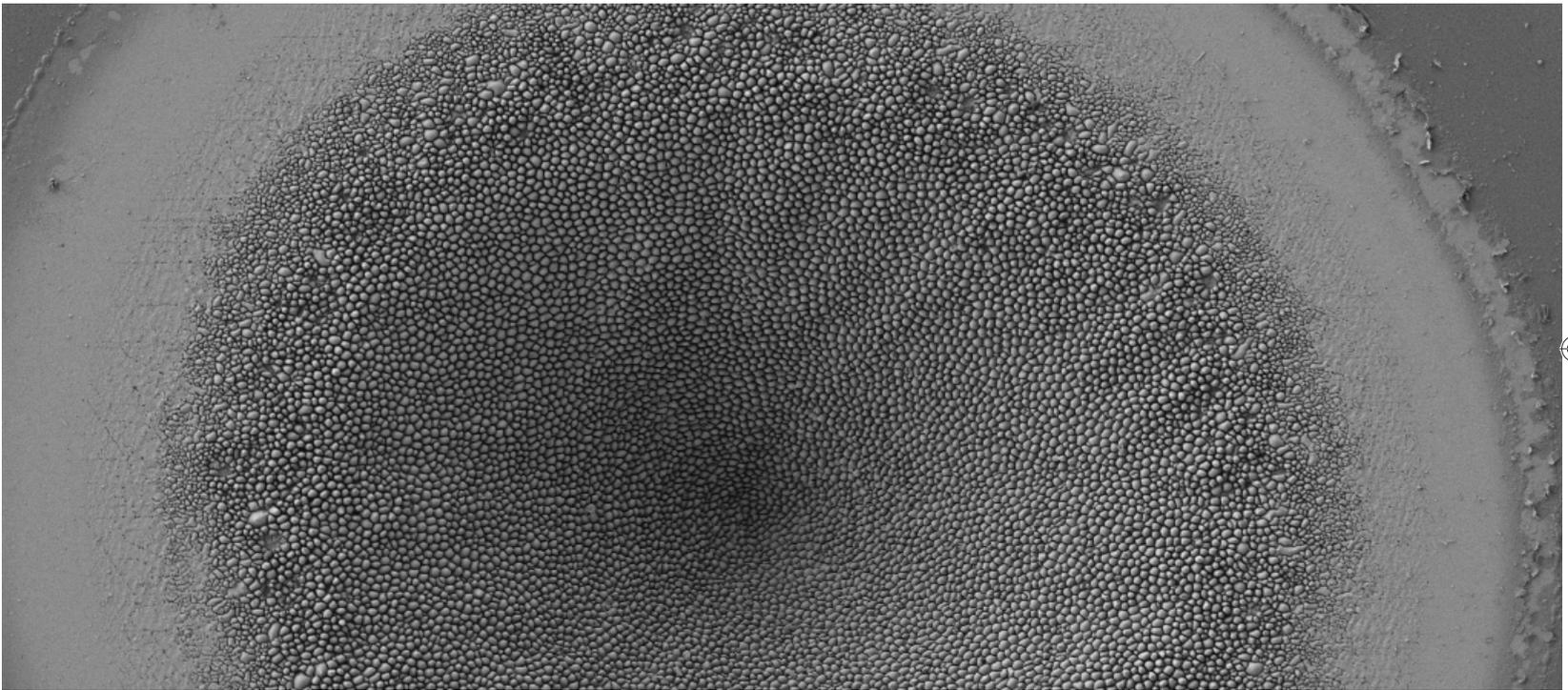
De 2009 à 2013, le nombre de contrats européens est passé de 5 à 9, de contrats ANR de 10 à 11, et d'autres contrats nationaux de 20 à 31 (Région/département, industriel, DGA,

Investissements d'avenir, etc...). Ces données ne prennent pas en compte les financements obtenus par le LOA et ses partenaires du plateau de Saclay concernant les programmes APOLLON-LUIRE d'ILE (CPER - Ministère de la Recherche).

Contrats en cours avec financement LOA supérieur à 1 M€	Origine	financement (M€TTC)	durée (ans)
ERC Advanced Grant - Accélérateur laser Plasma	Europe	2,25	5
ERC Consolidator Grant - Diffraction d'électron ultrarapide	Europe	1,7	5
ERC Advanced Grant - LEL laser-plasma	Europe	1,7	5
PEA - Antenne virtuelle	DGA	1,2	3
PEA - Emetteur basse fréquence par filamentation laser	DGA	1,93	4
EQUIPEX ATTOLAB - SESAME ATTOLIGHT - plasma laser at-toseconde	IA-Région	1,2	7

Contrats distribués au prorata de leur durée (au 30 juin 2013, € TTC).





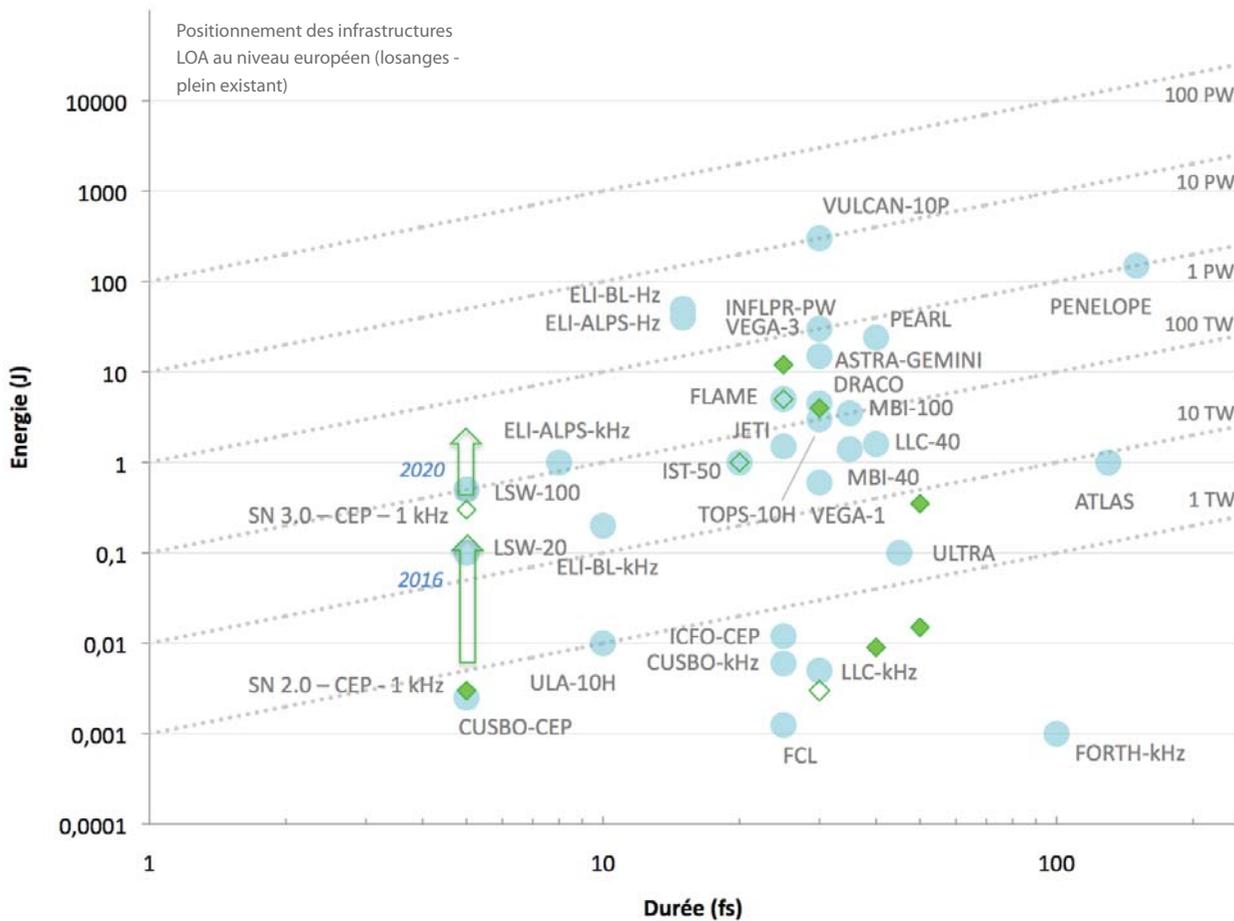
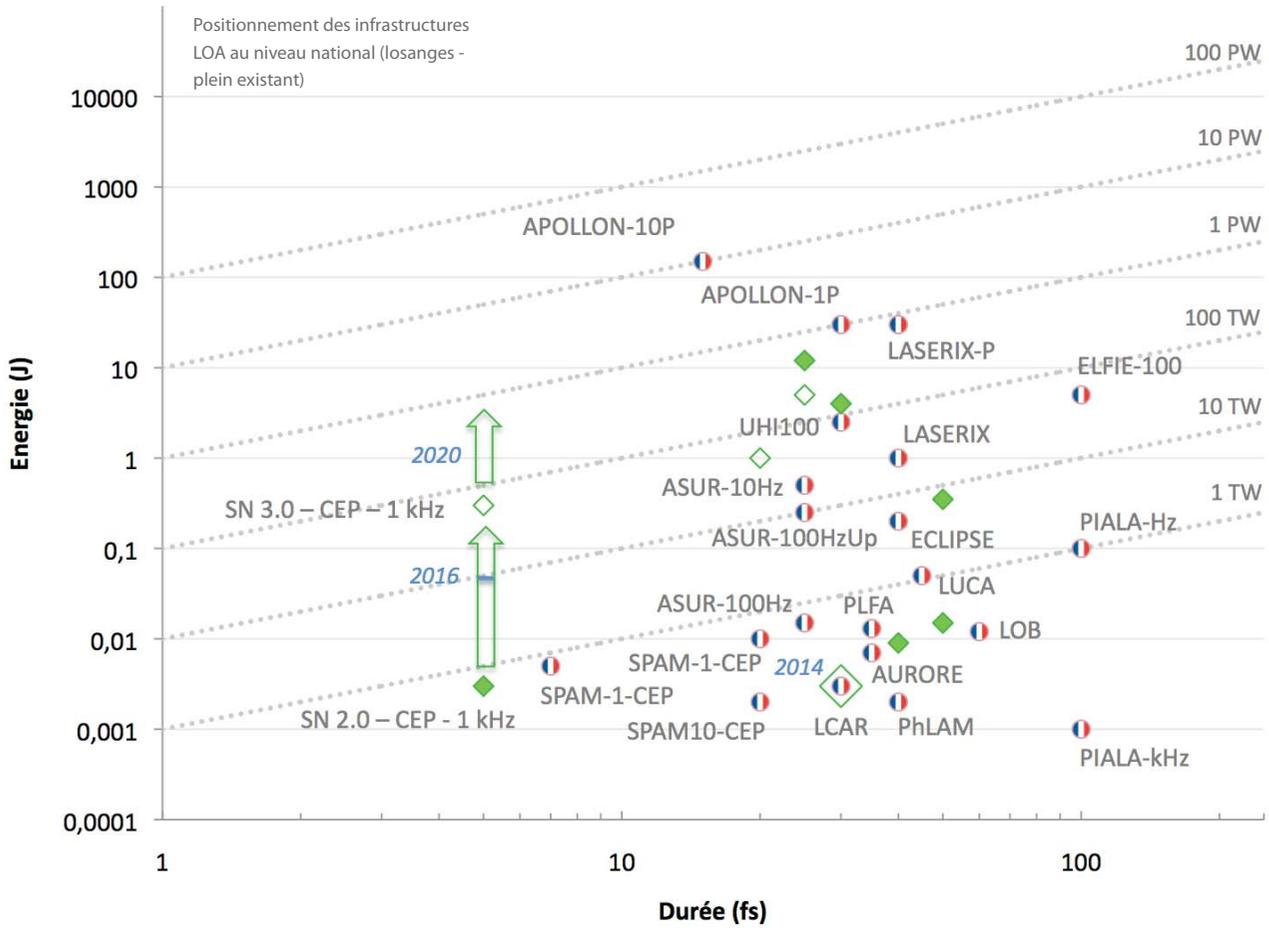
Chiffres clés

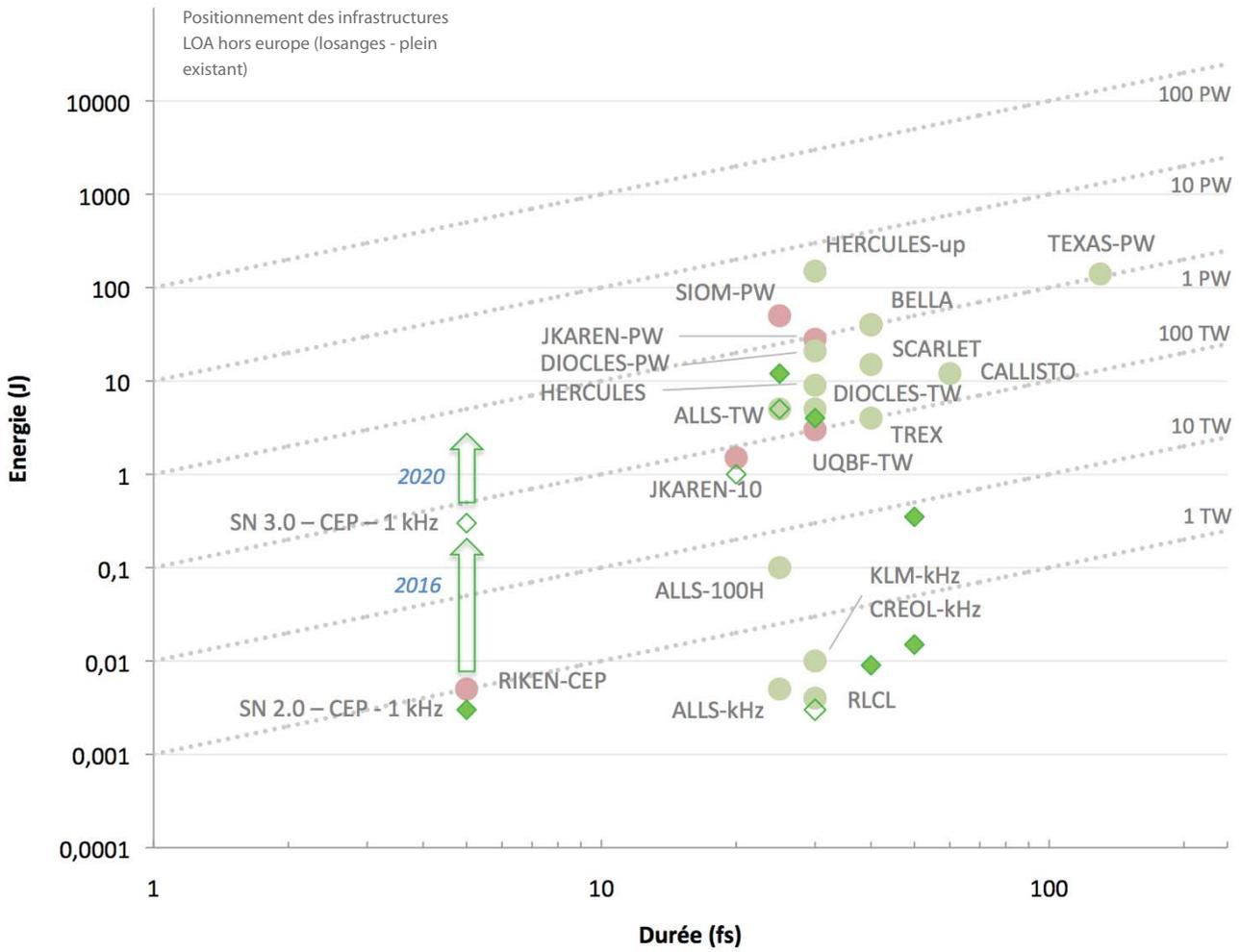
Effectifs au 30 juin 2013	total	Chercheur permanent	ITA	chercheur non-permanent	ITA non permanent	Thésard	visiteur
ILM	10	3	1	2	1	3	-
SPL	13	5	1	3	-	3	1
FCB	1	1	-	-	-	-	-
LHP	10	2	3	3	-	2	-
FLEX	12	5	2	2	-	2	1
PCO	11	4	3	2	-	2	-
OPS	4	1	1	1	-	1	-
APPLI	8	2	1	2	1	1	1

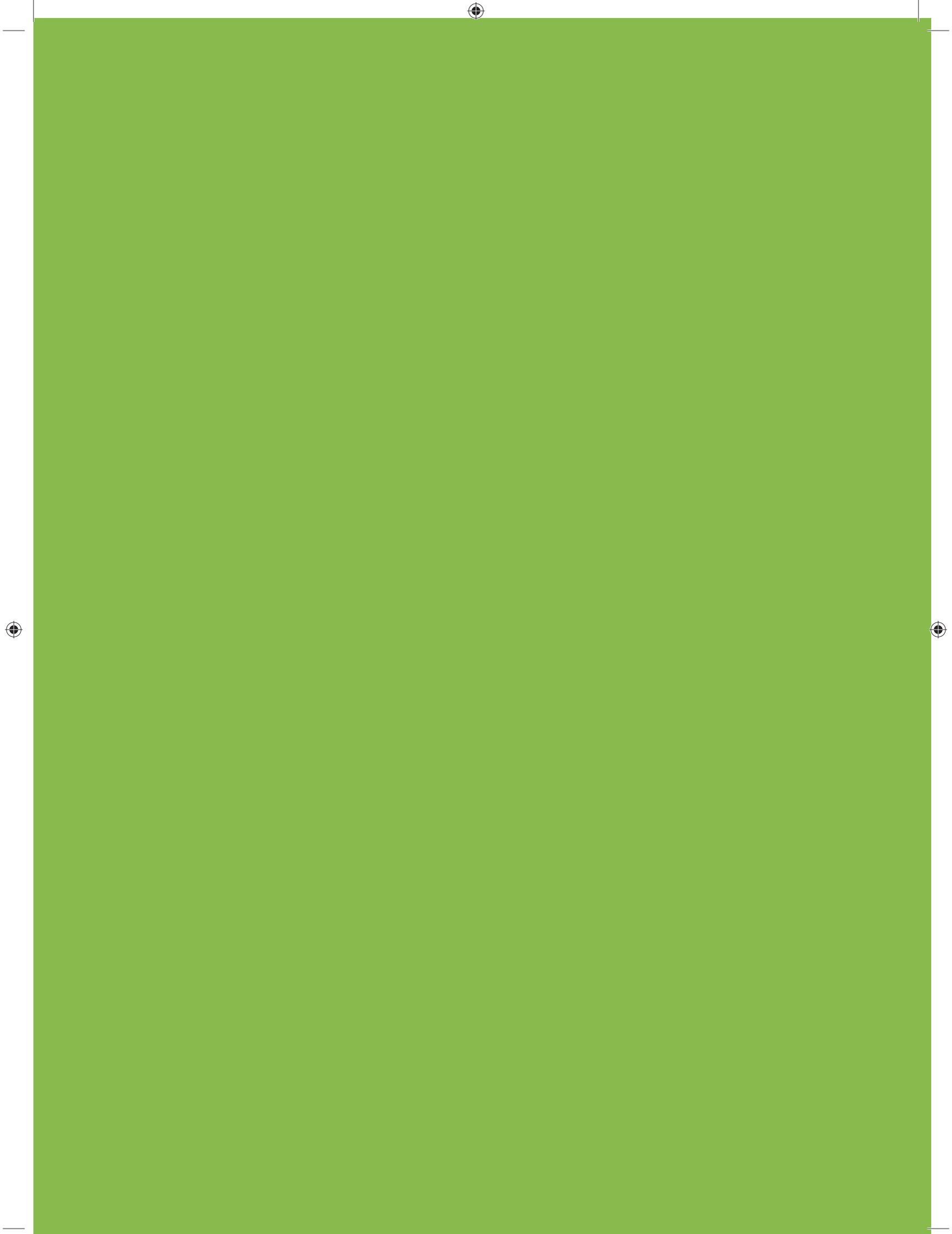
Publications 2008 - 30 juin 2013	ILM	SPL	FCB	LHP	FLEX	PCO	OPS	APPLI créé au 01/01/2013
Articles avec comité de lecture	44	86	17	9	96	40	26	55*
Articles sans comité de lecture	5	33	35	6	6	-	-	15*
Chapitres de livre	2	2	5	1	4	-	-	-
Conférences invitées	47	70	27	2	50	32	7	10*
Conférences orales et posters	63	84	10	8	19	57	30	33*
Thèses soutenues	4	5	-	2	8	5	4	-
HDR soutenues	-	1	-	1	1	1	1	-
Prix	1	17	-	-	5	1	3	1*
Brevets déposés	5	1	-	3	1	1	1	-

*Inclus dans les statistiques APPLI les travaux aussi effectués par les chercheurs dans leurs groupes d'origine au LOA

Contrats en cours 2008-30 juin 2013	Nombre	montant M€ TTC	Européens	ANR	Industriel	Investissement d'Avenir	Région	DGA	Autre
ILM	17	4,9	1	2	6	-	-	8	-
SPL	17	7,7	9	4	2	2	-	-	-
FCB	1	0,18	-	-	-	1	-	-	-
LHP	17	1,2	1	3	3	1	-	9	-
FLEX	34	5,3	9	9	-	8	2	1	5
PCO	18	2,72	3	3	2	3	2	4	1
OPS	6	0,94	-	2	1	1	2	-	-
APPLI	2	1,84	1	-	-	1	-	-	-









RAPPORT D'ACTIVITE 2008-2013

Laboratoire d'Optique Appliquée
LOA

ENSTA Paristech,
Campus de l'École Polytechnique
828 Boulevard des Maréchaux
91762 Palaiseau cedex, FRANCE
tél. +33 (0)1 69 31 9709
fax. +33 (0)1 69 31 9996
web: <http://loa.ensta-paristech.fr>