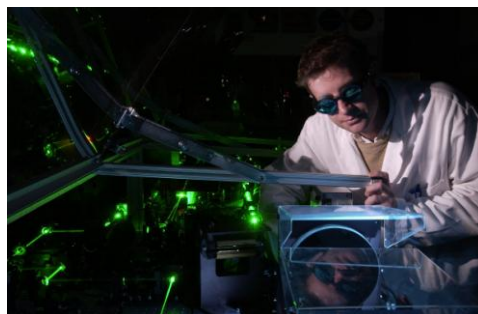


Dossier : Les lasers à l'IRAMIS

B. Carré, P. Monot, P. d'Oliveira, & L. Barbier
CEA - Saclay

Dossier : les lasers à l'IRAMIS

- **Les sources lasers à l'IRAMIS**
- **Applications du laser à l'IRAMIS**
- **Derniers faits marquants "Laser" à l'IRAMIS**
- **Bref historique du laser à Saclay**
- **Groupe de G. Mainfray : Point historique sur les lasers de puissance à Saclay**
- **Quelques dates clés autour des lasers**



50^{ème} anniversaire du Laser

2010 est le 50^{ème} anniversaire de la découverte du laser. Si le laser a de nombreuses applications dans le domaine grand public (applications médicales, lecteur laser de CD ou DVD, imprimante laser, laser d'alignement, spectacles...), il reste toujours un outil de recherche incontournable, avec des progrès constants : puissance, accordabilité et extension au domaine rayons X, biéveté d'impulsion, autant de paramètres où les extrêmes sont explorés. A l'IRAMIS, plusieurs équipes sont aujourd'hui spécialistes des lasers, soit en participant à leurs développements, soit en les mettant en oeuvre dans de nombreuses études et applications dans tous les domaines. Pour ceci l'IRAMIS s'est notamment doté d'une entité "SLIC" (Saclay Laser-matter Interaction Centre) comprenant plusieurs équipements lasers à la pointe de la recherche.



Les activités de recherches sur le laser et avec les lasers sont présentes sur le Centre de Saclay depuis ses origines. Le bref rappel historique ci dessous rappelle la contribution des équipes qui ont fait ce qu'est l'IRAMIS aujourd'hui.

Quelques dates autour des lasers à l'IRAMIS (anc^t DRECAM) et au CEA

1956 : Jean Combrisson publie deux articles avec Charles Townes sur un milieu semiconducteur amplificateur micro-onde, qui contribuera à la découverte du Maser (avec M pour micro-onde)

1966 : Création du SPAS Service de Physique des Atomes et des Surfaces, dirigé par C. Manus, et du groupe C. Manus - G. Mainfray étudiant les processus multiphotoniques.

1979 : Première observation de l'ionisation multiphonique

1987 : Observation de la génération d'harmoniques d'ordre élevé (jusqu'à $n \sim 130$...) dans un gaz atomique

1990 : Serveur laser femtoseconde du DRECAM (actuel IRAMIS) à Saclay.

1997 : Laser 10 terawatt (UHI : Ultra-Haute Intensité) à Saclay.

2002 : Plateforme SLIC de l'IRAMIS à Saclay, grande infrastructure européenne en 2003.

2008 : Puissance du laser UHI portée à 100 TW.

Quelques liens WEB sur les lasers à l'IRAMIS :

[The Saclay Laser-matter Interaction Centre \(SLIC\)](#)

[Le SPAM \(Service de physique des Atomes et Molécules\)](#)

[Consortium européen LASERLAB](#)

Sur le Plateau de Saclay,

L'IRAMIS collabore, à travers divers projets de recherche, avec l'ensemble des laboratoires du Plateau de Saclay impliqués dans les études sur et avec les lasers :

- Projet européen : [Extreme Light Infrastructure \(ELI\)](#) pour un laser exawatt (10^{18} W / impulsion attoseconde (10^{-18} s) !)
- Le projet Européen : Extreme Light Infrastructure (ELI). [Collaborating Institutions and Countries](#)
- [LOA : Laboratoire d'Optique Appliquée](#) (UMR : ENSTA-Paris Tech - CNRS - École Polytechnique)
- [ENSTA-Paris Tech](#) : École Nationale Supérieure de Techniques Avancées (et Laboratoire d'Optique Appliquée : LOA)
- [LULI](#) : Laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses
- [Institut d'Optique](#) et le Le laboratoire Charles Fabry (Orsay)
- Projet ILE (Institut de Lumière Extrême Polytechnique - ENSTA) (voir [article du Conseil régional d'Ile de France](#))
- [CLUPS](#) : Centre Laser de l'Université Paris Sud 11 EA 4127 et sa [plateforme LASERiX](#) implantée au LOA.
- [LPGP](#) : Laboratoire de Physique des Gaz et des Plasmas (Université Paris-Sud Orsay)
- [LOB](#) (Laboratoire d'Optique et Biosciences - Polytechnique)
- [LIXAM](#) : Laboratoire d'interaction du rayonnement X avec la matière (LIXAM, UMR 8624) Univ Paris-Sud, Orsay

[CELIA](#) : CEntre Lasers Intenses et Applications, Université de Bordeaux 1

Les lasers : aujourd'hui et demain à l'IRAMIS.

Pascal d'Oliveira

La plateforme laser SLIC

Parmi les nombreux lasers implantés à l'IRAMIS, la [plateforme de serveurs laser SLIC](#) (Saclay Laser Matter Interaction Center) tient une place particulière. Alors que les lasers de l'IRAMIS sont habituellement attachés à une équipe ou à un Service particulier, SLIC est une plateforme mutualisée ouverte à tous les chercheurs de l'IRAMIS. Les chercheurs extérieurs au CEA peuvent également accéder aux installations de SLIC au travers d'appels d'offres lancés au niveau national et au niveau européen.

La plateforme laser SLIC comprend trois lasers principaux appelés LUCA, PLFA et UHI. Le point commun de ces lasers est de produire des impulsions lumineuses à la fois très courtes et très puissantes : la durée des impulsions est de quelques dizaines de femtosecondes (fs) seulement ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$) tandis que leur puissance instantanée relève du Terawatt ($1 \text{ TeraWatt} = 1 \text{ TW} = 10^{12} \text{ W}$) et atteint même 100 TW sur le laser UHI. Dans le langage des laséristes, les lasers du SLIC sont appelés lasers Terawatt compacts ou lasers T3 pour "Table-Top Terawatt". Le milieu laser utilisé est le Titane-Saphir, milieu cristallin émettant dans une large plage centrée autour de 800 nm, à la limite entre le visible et l'infra-rouge. Au sein de SLIC,

- UHI est le laser le plus puissant : il produit des impulsions de 100 TW à 10 Hz.
- PLFA est le laser le plus récurrent, délivrant à 1 kHz des impulsions de 0.4TW.
- LUCA, est un serveur multi-utilisateurs pouvant accueillir 5 expériences simultanément avec une puissance par impulsion allant jusqu'à 1 TW, à la cadence de 20Hz.

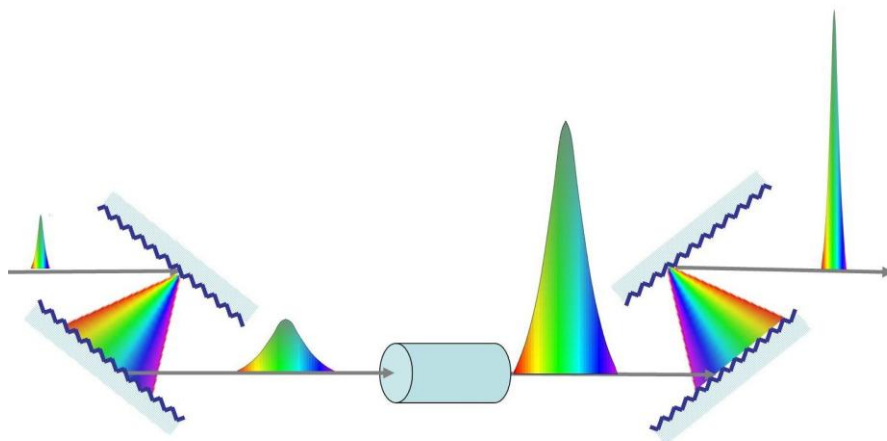


Schéma d'amplification d'une impulsion femtoseconde par étirement temporel, amplification et compression temporelle de l'impulsion par dispersion de la lumière sur des réseaux.

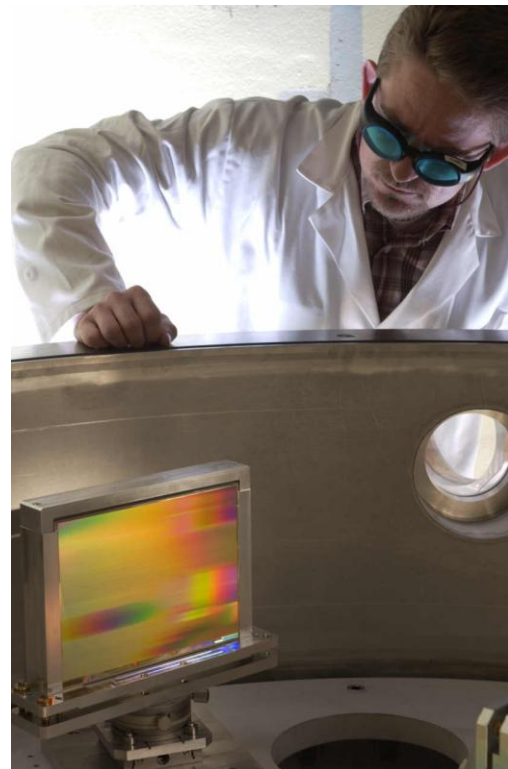
Les lasers T3 sont apparus au milieu des années 80 quand Gérard Mourou proposa et démontra un nouveau schéma d'amplification permettant de produire une impulsion intense à partir de barreaux laser de taille centimétrique. Cette technique appelée CPA, pour "Chirped Pulse Amplification", consiste à étirer temporellement à plusieurs centaines de picosecondes une impulsion de faible énergie initialement femtoseconde avant de l'amplifier dans une série d'amplificateurs jusqu'à une énergie de l'ordre du Joule. L'impulsion amplifiée est ensuite recomprimée temporellement à sa durée femtoseconde initiale. Cette manipulation de la durée de l'impulsion permet de maintenir dans les amplificateurs un écoulement de l'énergie suffisamment progressif pour éviter de les endommager par des phénomènes non linéaires,

comme l'autofocalisation Kerr, qui se produisent lorsque des champs électromagnétiques élevés transitent dans des milieux optiques denses tels que les barreaux d'amplification laser.

L'intérêt des lasers femtoseconde intenses est double. La faible durée d'impulsion va permettre d'étudier des phénomènes ultra-rapides en physique et en chimie avec une résolution temporelle sub-picoseconde. On peut parler de stroboscopie ultra-rapide. Par exemple, la durée femtoseconde correspondant à la période de vibration des atomes dans les molécules, l'une des applications des lasers femtosecondes va concerner l'étude cinétique du déroulement de réactions chimiques. Ce domaine est appelé femtochimie et a été honoré par l'attribution d'un prix Nobel à A. Zewail en 1999. D'autre part, en concentrant l'énergie pourtant assez modeste ($<1\text{J}$) de l'impulsion sur des temps très faibles, on peut atteindre les puissances très élevées requises pour l'étude de la physique en champ fort ou à ultra haute intensité. Ces domaines de la physique sont des extensions de l'optique non linéaire vers des éclaircissements plus élevés. Les éclaircissements correspondant, obtenus au foyer d'optiques focalisantes, sont de l'ordre de $10^{14}\text{W}/\text{cm}^2$ pour la physique en champ fort ; ils peuvent dépasser $10^{19}\text{W}/\text{cm}^2$ pour la physique à ultra haute intensité. Cette valeur, supérieure au champ électrique intra-atomique, correspond à l'éclaircissement qui serait atteint si le rayonnement émis par le soleil était concentré à l'intérieur d'une pièce d'une dizaine de m^2 . L'étude du comportement de la matière soumise à une telle irradiation lumineuse est un domaine de recherche encore neuf qui a déjà révélé des phénomènes spectaculaires tels que la génération d'harmoniques élevées ou l'accélération de particules.

La gestion de la plateforme SLIC est confiée à une équipe d'une dizaine d'opticiens alliant techniciens, ingénieurs et physiciens. Outre l'exploitation des lasers UHI, LUCA et PLFA, cette équipe poursuit des programmes de R&D visant à maintenir la compétitivité des lasers du SLIC au meilleur niveau international et à développer les diagnostics optiques nécessaires à leur caractérisation fine. Ces diagnostics couvrent en particulier la détermination des caractéristiques temporelles de l'impulsion. Il peut s'agir de reconstituer l'allure générale de l'impulsion ou de déterminer son contraste temporel, c'est-à-dire estimer le niveau de l'énergie parasite présente en amont de l'impulsion principale. Ces travaux sont souvent réalisés en proche collaboration avec des partenaires industriels.

Chaque année, plus de 80 scientifiques, dont un tiers sont extérieurs au CEA, utilisent les lasers du SLIC. SLIC est une grande infrastructure européenne depuis 2003 et membre du consortium européen [LASERLAB](#) depuis 2004.



Réseau de diffraction du compresseur optique du laser UHI10 de Saclay.

Il permet de réduire d'un facteur 10000 la durée des impulsions lumineuses et d'augmenter d'autant la puissance du laser.

Derniers faits marquants sur les lasers à l'IRAMIS

(http://iramis.cea.fr/Phoce/Vie_des_labos/Ast/ast.php?t=fait_marquant)

- Cristaux scintillateurs : trop de photons tuent le photon !
- Imagerie attoseconde d'orbitales moléculaires
- Imagerie ultra-rapide par tir laser unique d'objets nanométriques par diffraction cohérente de rayons X
- Cristaux de CaF_2 dopé Ytterbium pour la prochaine génération de lasers de forte-puissance/forte énergie
- La dynamique cohérente des Miroirs Plasmas
- Des molécules pour contrôler les impulsions lumineuses à l'échelle attoseconde
- Harmoniques cohérentes du Laser à Electrons Libres générées à partir d'harmoniques produites dans les gaz.



L'IRAMIS s'est doté de trois "gros" systèmes lasers femtosecondes - PLFA, LUCA, UHI100 -, installés dans les locaux du SPAM qui en assure la mise en œuvre et porte la R&D associée (voir § SLIC). Les lasers sont accessibles aux utilisateurs de l'IRAMIS et du CEA, mais aussi aux utilisateurs nationaux (offre de temps laser commune aux Laboratoires d'Optique Appliquée de l'ENSTA-Ecole Polytechnique et IRAMIS-SLIC) et européens (FP7-I3 Laserlab-2).

A côté des trois "gros" systèmes ci-dessus, les labos de l'IRAMIS disposent de plusieurs lasers spécifiques également ouverts aux utilisateurs CEA et extérieurs.

Chaque chaîne laser a ses caractéristiques propres permettant d'atteindre les meilleures performances en durée d'impulsion, puissance ou domaine de longueur d'onde ainsi que d'accordabilité. Les applications utilisent principalement les lasers femtosecondes (10^{-12} s) dont les caractéristiques essentielles sont les suivantes :

Source laser primaire : laser ionique Ar (514.5 nm), Nd:YAG, Nd:YLF, and Nd:YVO doublés en fréquence (527-532 nm).

Source laser secondaire : Lasers accordables Ti:saphir ($\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$) lasers, titanium-sapphire lasers, or simply Ti:sapphs) are tunable lasers which emit red and near-infrared light in the range from 650 to 1100 nanometers.

•1. Durée ultra-brève des impulsions, typiquement de 40 fs à moins de 10 fs. Les impulsions de lumière (800 nm pour les systèmes Ti:saphir) présentent des propriétés de cohérence - de phase spectrale/temporelle et spatiale qui sont bien définies - permettant de varier à la demande, le profil temporel ou spatial de l'impulsion. Le calage de l'onde porteuse dans l'enveloppe de l'impulsion (on parle de stabilisation de la phase), en cours de réalisation sur la chaîne PLFA, introduit un degré supplémentaire de contrôle dans les applications.

•2. Puissance crête très élevée : du TW à la centaine de TW (1 térawatt (TW) = 10^{15} W) . Elle permet d'atteindre des éclaircements (densité de puissance par unité de surface) considérables générant un champ électrique pouvant être supérieur au champ intra atomique ($E_{at} = 5.10^9$ V/cm, soit $I_{at} \sim 7.10^{16}$ W/cm²). L'interaction avec la matière en phase gazeuse ou condensée est alors très fortement non linéaire (ionisation multiple en régime tunnel, génération d'harmoniques dans les gaz), jusqu'à atteindre les régimes dits relativiste et ultra-relativiste (génération d'harmoniques dans les plasmas, accélération d'électrons et d'ions).

•3. Sources secondaires, soit de lumière dans le domaine spectral extrême-UV, soit de particules énergétiques, électrons et ions, par interaction fortement non linéaire/ en régime relativiste avec une cible gazeuse ou solide (voir ci-dessous). Les sources secondaires de

lumière extrême-UV (XUV, par génération d'harmoniques d'ordre élevé) étendent notablement l'accordabilité des lasers femtosecondes, que l'on obtient déjà dans le visible-UV par des techniques d'optique non-linéaire classiques. Les impulsions de lumière XUV peuvent avoir une durée d'une centaine d'attosecondes ($1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$).

- 4. Les sources primaires et secondaires sont parfaitement synchronisées entre elles. On peut ainsi imaginer de nombreux schémas d'excitation à plusieurs fréquences, des études dynamiques résolues en temps de type pompe-sonde.

Les applications des sources femtosecondes primaires et secondaires intéressent plusieurs grands domaines d'activité, en tirant parti de ces propriétés. Tous les domaines de la physique femtoseconde à haute intensité sont représentés à l'IRAMIS. De plus, l'IRAMIS contribue aux études de la matière à forte densité d'énergie, telle que les plasmas produits sur les lasers de très forte énergie (LULI, LIL et, LMJ à partir de 2012).



●1. Les applications des sources lasers (Bertrand Carré)

●1.1. Interaction rayonnement-molécule

●1.1.1 Dynamique moléculaire femtoseconde : Femtochimie

La femtochimie (SPAM et SIS2M) étudie l'interaction des systèmes moléculaires avec la lumière aux échelles de temps femtosecondes, temps caractéristique des dynamiques électronique - ionisation, désexcitation radiative, transfert/migration de charge - et nucléaire - vibration, dissociation, isomérisation, réarrangement dans une réaction chimique. après excitation par une impulsion ultra-brève. Par les études en dynamique réactionnelle on peut ainsi suivre en temps réel une réaction chimique, et accéder aux forces induites par la déformation du (ou des) nuage électronique qui entraînent les noyaux.

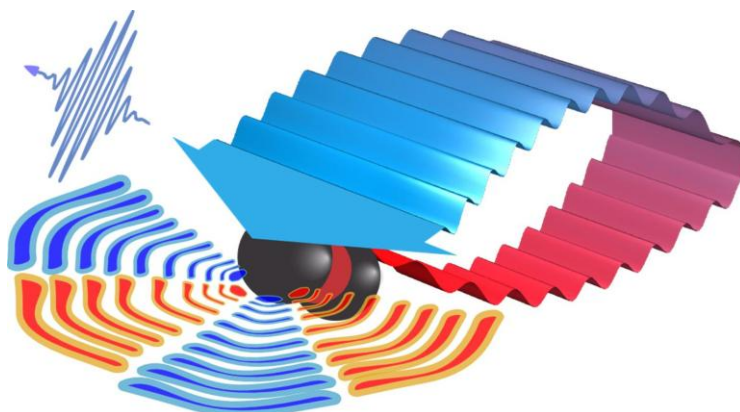
Il est remarquable que la femtochimie considère avant tout des *dynamiques cohérentes* de paquets d'ondes électroniques ou nucléaires dont les phases quantiques sont bien définies. On peut les considérer comme des modèles des dynamiques "naturelles" (faiblement cohérentes) dans des systèmes complexes allant des petites molécules aux gros systèmes (molécules biologiques, agrégats).



Chaîne d'amplification

●1.1.2 Dynamique moléculaire ultra-rapide (subfemtoseconde) : Attoscience

Lors d'une impulsion laser intense sur un atome ou une molécule, le champ électrique associé induit un mouvement d'oscillation - fortement non linéaire - des électrons du système, formant un paquet d'ondes électronique quasi-libre ultra-court (voir figure). A chaque oscillation, il y a *recollision* du paquet d'ondes avec la molécule dont il est issu. Le paquet d'ondes électronique peut alors être diffracté (ionisation) ou se recombiner radiativement dans l'état lié, en réémettant une impulsion de lumière ultra-brève - attoseconde. Dans ce cas le mouvement d'oscillation du paquet d'ondes électronique est équivalent à un dipôle non linéaire rayonnant, générant des harmoniques élevées de l'impulsion laser excitatrice. Ce processus, permet de réaliser des sources laser secondaires dans l'extrême-UV aux propriétés uniques, délivrant des impulsions dont la durée est aussi courte qu'une centaine d'attosecondes.



Génération d'une impulsion harmonique attoseconde dans l'extrême UV, après excitation par une impulsion intense entraînant l'oscillation du paquet électronique.

La recollision du paquet d'ondes électronique dans une molécule en champ fort (impulsion laser très intense) : Les deux voies de diffusion cohérente du paquet d'ondes électronique, la diffraction et la recombinaison radiative, contiennent des informations spatiales et temporelles sur la structure nucléaire et électronique de la molécule, fournissant une "photographie" de la structure atomique et électronique,

L'électron diffracté comme la lumière XUV émise emportent une information très riche sur l'état lié de la molécule qui les a produits et avec lequel ils ont interagi (on parle de "sonde du système par lui-même" ou "self-probing"). En analysant la diffraction électronique ou l'émission attoseconde, il est possible de produire une image spatiale - avec une résolution subnanométrique - et instantanée - à la résolution d'une centaine d'attosecondes - de l'orbitale moléculaire liée à la source du paquet d'ondes électronique.

En principe, on doit pouvoir suivre "en image" la déformation de l'orbitale moléculaire (de la fonction d'onde) dans un processus très rapide tel qu'une dissociation ou une isomérisation. Des travaux sont en cours au SPAM/groupe Attophysique pour se rapprocher de cet objectif très ambitieux.

●1.1.3 Interaction du rayonnement avec les molécules biologiques

La physico-chimie du vivant est largement représentée à l'IRAMIS. On y étudie notamment :

- la conformation des biomolécules (peptides, agents de contraste pour l'IRM) en phase gazeuse, ou de, dans des états stationnaires ou dynamiques (molécules excitées par laser), en utilisant la spectroscopie IR-vis-UV (LFP/groupe Structures biomoléculaires).
- l'effet des rayonnements ionisants sur les molécules biologiques (ADN).

Dans l'interaction de l'ADN avec le rayonnement UV, on cherche à identifier les réactions photochimiques (cassure des chaînes peptidiques) qui pourraient induire des mutations cancérogènes (LFP/Biomolécules excitées). Au-delà de la femtochimie, les processus d'endommagement se développent à des échelles de temps qui vont de la femtoseconde aux millisecondes (secondes).

A partir de la radiolyse de l'eau liquide (par un faisceau d'électrons énergétiques), qui produit des radicaux (OH), on étudie l'action oxydante des radicaux sur les molécules biologiques. On pourra également caractériser l'effet protecteur d'espèces (bio)chimiques antiradicalaires ou antioxydantes (SIS2MLaboratoire de radiolyse).

●1.2. Interaction laser-solide

Comme dans les molécules en phase gazeuse/liquide, l'interaction d'un solide avec une impulsion femtoseconde intense induit des processus dynamiques très variés. Par exemple, dans un solide diélectrique, la séquence de processus qui se développent à différentes échelles temporelles (de la femtoseconde à la milliseconde !), inclut l'ionisation, le chauffage des électrons libres, les transferts d'énergie électron-réseau, la création d'excitons (paires électron-trou), la relaxation par luminescence, etc...; elle peut conduire au claquage optique et à l'ablation du matériau. Le LSI a développé des techniques performantes pour caractériser en temps réel l'évolution des propriétés électroniques du solide.

A côté de leur intérêt fondamental, les études ont une portée applicative directe - tenue aux flux des optiques, développement de scintillateurs, maîtrise du façonnage de matériaux par laser.

●1.3. Physique à ultra-haute intensité

Les lasers de puissance de classe 0,1-1 PW permettent aujourd'hui d'atteindre des éclaircissements considérables, de 10^{18} à 10^{20} W/cm². A ces éclaircissements qui définissent le régime relativiste d'interaction, dans le plasma produit par l'interaction du laser avec une cible solide ou gazeuse, les électrons deviennent relativistes (leur énergie cinétique \sim GeV est de l'ordre de leur masse au repos) ; les ions sont accélérés jusqu'à plusieurs dizaines de MeV ; des neutrons sont également émis. Finalement, dans les plasmas relativistes, le mouvement cohérent des électrons sous l'effet des champs laser et plasma conduit à l'émission d'impulsions de lumière ultra-brèves - attosecondes - et très intenses dans l'extrême-UV (dont les propriétés sont voisines de celles, moins intenses, générées à plus faible éclaircissement dans un gaz).

Ces processus spectaculaires - accélération d'électrons & d'ions, génération d'impulsions de lumière ultra-brèves - sont étudiés sur le laser UHI100 (100 TW) par le groupe de Physique à Haute Intensité du SPAM.

Les émissions secondaires de particules et de lumière servent deux objectifs :

- comprendre la physique de l'interaction
- utiliser les sources pour développer des applications originales, dans des domaines aussi variés que la physique (diagnostics plasmas), la science des matériaux (radiographie, diffraction électronique et de photons), la chimie (radiolyse, étude de surface), la médecine (protonthérapie, radiothérapie, imagerie).

Accélération d'ions par laser

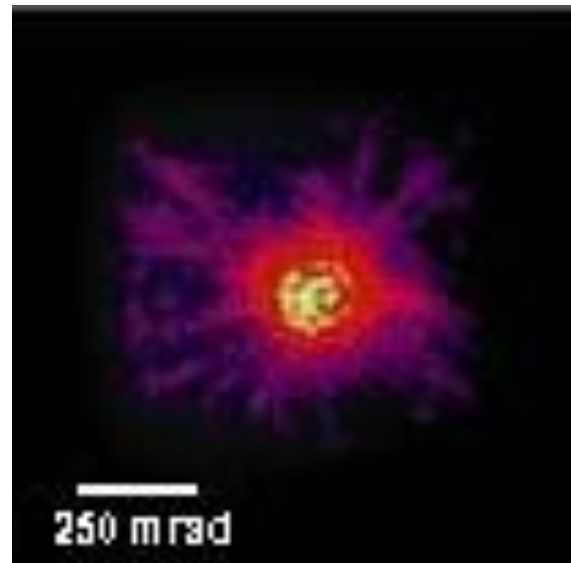
Les caractéristiques de haute énergie, faible divergence, courte durée et faible émittance des paquets de protons accélérés les rend particulièrement intéressants pour un large éventail d'applications : l'exploration à haute résolution des champs électriques dans les plasmas, l'allumage rapide (fast ignitor) dans la fusion par confinement inertiel, l'excitation des noyaux, la production d'isotopes pour des applications médicales et la protonthérapie.

Accélération d'électrons par laser

Comprendre les mécanismes de l'accélération d'électrons permet d'en contrôler les caractéristiques (énergie, durée, divergence) en fonction des applications visées. Les faisceaux d'électrons accélérés par laser offriront d'ici peu une technique alternative, compacte et peu coûteuse, aux accélérateurs conventionnels. Ils seront également utiles à la radiolyse, au diagnostic ultra-rapide de matériaux. On envisage également leur emploi dans le traitement des tumeurs cancéreuses. Ils pourraient, à terme, remplacer les petits accélérateurs déjà présents en salle d'opération, pour irradier la zone périphérique à la tumeur après son ablation.

Sur le Plateau de Saclay, les perspectives de la physique UHI sont brillantes, et de long terme. Les principaux acteurs « laser », LOA-ENSTA-Ecole Polytechnique, LULI, IRAMIS, Paris-Sud-Laserix, se sont concertés pour porter collectivement l'Institut de la lumière Extrême (ILE), qui construit le laser Apollon de classe 10-20 PW (durée d'impulsion 15 fs). Apollon atteindra des éclaircissements de l'ordre de 10^{24} W/cm², ouvrant l'accès au régime ultra-relativiste de l'interaction laser-plasma (protons relativistes, ayant une énergie cinétique égale à leur énergie de repos). Les processus d'accélération de particules et d'émission X recensés ci-dessus, très non linéaires, gagneront en magnitude plusieurs ordres de grandeurs : on pourrait accélérer les électrons jusqu'au TeV, dépassant les performances des plus grands accélérateurs.

L'Institut de la Lumière Extrême participe au consortium européen qui prépare la d'ELI (Extreme Light Infrastructure). Le projet ELI comporte plusieurs étapes qui devraient, à l'horizon 2015-2020, conduire à un laser Exawatt atteignant des éclaircissements de 10^{26} W/cm². La recherche auprès d'ELI aura un caractère essentiellement fondamental ; elle promet des avancées dans les domaines tels que l'électrodynamique quantique non linéaire (QED, création de paires e-p dans le vide...), la gravitation (radiation de Unruh-Hawking, trous noirs...), la physique des collisions au TeV (électrons...) ou encore accélération d'ions (protons de 100 GeV, production de plasmas de quarks-gluons...).



Profil spatial d'un faisceau d'électrons d'énergie 12 MeV.

•1.4. Physique de la matière à très haute densité d'énergie (MHDE)

Le CEA est le constructeur et l'opérateur des Très Grands Instruments Lasers que sont la LIL (Ligne d'Intégration Laser) et le LMJ (Laser MegaJoule) au CESTA. La LIL, ouverte aux utilisateurs depuis 2005 (?), délivre des impulsions relativement longues (durée 1 ns) mais de

très forte énergie (30 à 60 kJ) ; cette énergie sera multipliée par 24 (1,8 MJ) sur le LMJ. Les impulsions énergétiques portent la matière (cible solide) à l'état de plasma très dense (densité du solide) et très chaud (10^5 à 10^6 degrés K), encore appelé matière à très haute densité d'énergie (MHDE). A la différence de l'interaction à très haute intensité, dans laquelle la matière est violemment portée hors équilibre (siège de processus forcés transitoires tels que l'accélération de particules chargées dans le champ laser), la matière HDE atteint localement un état d'équilibre thermodynamique (état stationnaire relevant de la statistique de Boltzmann).

De tels plasmas existent en grand nombre et à très grande échelle dans la nature, notamment en astrophysique (cœur des étoiles, supernova). L'astrophysique de laboratoire se propose de les reproduire - de façon approchée - en laboratoire, moyennant une formidable réduction d'échelle (10^{15} !), et de décrire à l'échelle millimétrique des processus tels que les collisions de plasma, les jets astrophysiques, les chocs radiatifs.

C'est également dans un plasma HDE produit par le laser LMJ (à partir du mélange deutérium-tritium - DT) que l'on prévoit d'atteindre les conditions de la fusion par confinement inertiel (FCI). Avec la combinaison des lasers LIL et PETAL (600 fs, 7 PW, ultra-haute intensité, opérationnel en 2012 ?), on pourra de plus explorer le schéma dit «d'allumage rapide » : dans le plasma HDE, une impulsion très intense (PETAL) chauffe les électrons, déterminant une compression locale du milieu qui devrait amorcer la fusion.

A l'IRAMIS, le groupe SPAM/MHDE étudie, théoriquement et expérimentalement, les propriétés électroniques des plasmas denses et chauds (absorption/émission du rayonnement X et X-UV, résistivité, équations d'état qui lient densité, pression, température).

Le groupe est partenaire des consortiums nationaux/internationaux qui réalisent les expériences lourdes et complexes auprès des TGIL (LIL, LULI), en vue de la comparaison avec la modélisation.

Les outils de la modélisation HDE peuvent s'adapter à de nombreuses situations expérimentales, plus modestes que le monde des étoiles et la FCI. Par exemple, le groupe SPAM/MHDE a pu décrire l'émission XUV d'agrégats de gaz rare, une source considérée pour la nanolithographie du futur.

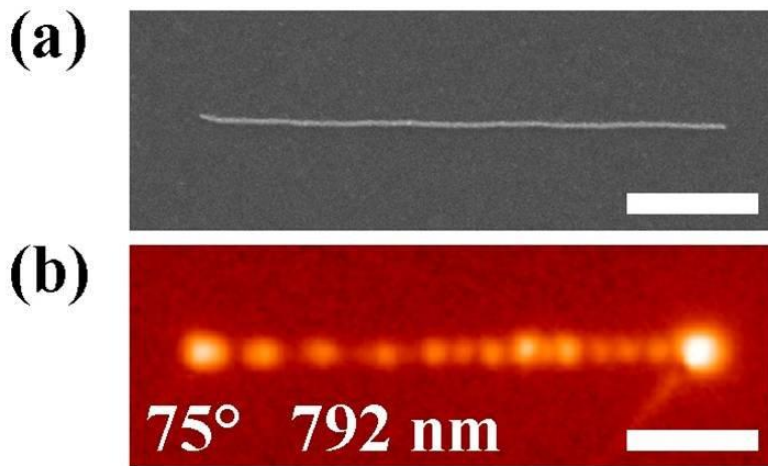
● **1.5. Laser, photonique et plasmonique (Equipe du SPCSI/LEPO, contacts : F. Charra - L. Douillard)**

La photonique comprend l'ensemble des sciences et technologies impliquées dans la production de photons, leur propagation et les conséquences de leur absorption par la matière. Les propriétés photoniques de la matière dépendent des propriétés intrinsèques de ses constituants, molécules dans le cas de matériaux organiques ou structure cristalline atomique dans le cas de matériaux minéraux. Le fil directeur de l'ensemble des travaux de recherche dans ce domaine à l'IRAMIS est de comprendre (et exploiter) comment l'organisation moléculaire ou de la matière à l'échelle nanométrique modifie les processus photoniques élémentaires. Avec l'avènement des nano-sciences, de nouveaux concepts scientifiques et techniques expérimentales sont apparus et ont fortement renouvelé les problématiques des sciences de la matière condensée. Nos études de **nano-photonique** sont ainsi basées sur la sonde locale des propriétés photoniques de la matière, directement à l'échelle atomique ou moléculaire.

● **Observer la compression de la lumière pour une gravure plus fine**

En observant pour la première fois en temps réel des plasmons à la surface d'un conducteur, des chercheurs du CEA, du CNRS et de l'université de Troyes font un nouveau pas vers toujours plus de miniaturisation.

Pour la première fois, une équipe de chercheurs du CEA, du CNRS et de l'université de Troyes a visualisé des plasmons à la surface de conducteurs de 30 nanomètres. Les plasmons sont des quasiparticules, c'est à dire des ondes lumineuses qui se déplacent en restant collées au métal conducteur. A cette échelle, le plasmon développe un mode lent où il oscille à la fréquence de l'onde lumineuse (de l'ordre de 10 puissance 15 Hz, précisent les chercheurs, soit



a) Fil d'or de 30 nm de diamètre et 4 μm de long. b) Observation PEEM du signal d'électrons émis montrant les interférences entre la lumière incidente et le plasmon qui se propage le long du fil. Rectangle blanc : barre d'échelle, 1 μm .

Mark Brongersma, de l'université de Stanford, lorsqu'il a créé un modèle théorique de processeurs où des plasmons devaient transmettre l'information d'un transistor à l'autre 100 000 fois plus vite que dans un Pentium de l'époque.

Aujourd'hui, la découverte des chercheurs français permet de franchir le premier pas vers la pratique en observant directement des états qui, jusque-là, n'existaient que sur le papier.

- Bulletin de l'Agence pour la Diffusion de l'Information Technologique (ADIT) : [La compression de la lumière observée en direct](#)

une fréquence un million de fois plus élevée que le gigahertz couramment rencontré dans les processeurs), mais avec une longueur d'onde bien plus courte. En théorie, il devient donc possible de combiner, dans un processeur à 30 nanomètres, une technologie de gravure standard et - via ces plasmons lents - des hautes fréquences optiques pour transmettre les informations.

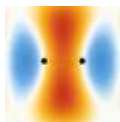
Cette voie a déjà été envisagée en 2004 par

Derniers faits marquants sur les lasers à l'IRAMIS :



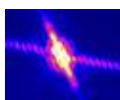
Cristaux scintillateurs : trop de photons tuent le photon ! - 03 mai 2010
Contacts : N. Fedorov¹ and S. Guizard¹, A.Vasil'ev² and A.Belsky³, M.Kirm⁴, V.Nagirny⁴ and E.Feldbach⁴ Pour caractériser un flux de rayonnement ou de particules (électrons, rayons g, photons X ou UV) les détecteurs à scintillation utilisent un ... [Lire la suite](#) »

Imagerie attoseconde d'orbitales moléculaires



S. Haessler, J. Caillat, W. Boutu, C. Giovanetti-Teixeira, T. Ruchon, T. Auguste, Z. Diveki, P. Breger, A. Maquet, B. Carré, R. Taïeb & P. Salières, - 11 février 2010 Visualiser le mouvement des électrons dans la matière demande d'avoir simultanément une résolution spatiale de l'ordre du dixième de nanomètre et une résolution temporelle à l'échelle attoseconde (1 as = 10⁻¹⁸ s). L'imagerie ... [Lire la suite](#) »

Imagerie ultra-rapide par tir laser unique d'objets nanométriques par diffraction cohérente de rayons X - 06 juillet 2009



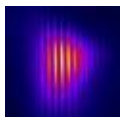
Pour obtenir une image d'un objet, il suffit usuellement de l'éclairer et d'enregistrer la lumière diffusée qui parvient à un détecteur. Si l'image est formée à l'aide d'un objectif, l'optique utilisée impose de nombreuses limitations ... [Lire la suite](#) »

Cristaux de CaF₂ dopé Ytterbium pour la prochaine génération de lasers de forte-puissance/forte énergie - 26 janvier 2009



Dans la poursuite de l'amélioration des chaînes laser de puissance, un axe majeur de développement est d'obtenir à la fois de meilleurs rendements et une meilleure accordabilité. Pour les futurs lasers devant fonctionner en pompage par diodes à haute cadence et ... [Lire la suite](#) »

La dynamique cohérente des Miroirs Plasmas - 20 octobre 2008



Depuis l'invention du laser on cherche à obtenir des faisceaux de longueur d'onde de plus en plus courte, dans le domaine des rayons X. Une des manières de produire du rayonnement XUV est de focaliser un laser intense dans un milieu matériel... [Lire la suite](#) »

Des molécules pour contrôler les impulsions lumineuses à l'échelle attoseconde - 13 mai 2008

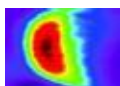


Les lasers d'aujourd'hui couvrent une vaste gamme de longueur d'onde et les lasers impulsions offrent une résolution temporelle qui permet d'observer par exemple les étapes d'une réaction chimique. Les impulsions lasers ultra-brèves atteignent aujourd'hui la gamme de la centaine d'attosecondes, l'attoseconde (1 as = 10⁻¹⁸ s) étant le temps caractéristique associé au mouvement des électrons dans les atomes... [Lire la suite](#) »

Nanoélectronique : observer en direct la compression de la lumière 12 mars 2008



Depuis les tous débuts de l'électronique, les efforts technologiques se sont poursuivis pour réaliser des circuits de plus en plus fins et permettant de traiter l'information à des fréquences de plus en plus élevées. Ainsi les dispositifs électriques, puis électroniques se sont miniaturisés, complexifiés (les micro-processeurs de nos ordinateurs) mais restent limités à des fréquences d'utilisation de l'ordre du gigahertz (1 GHz=10⁹ Hz, 30-300 GHz en laboratoire). Les fréquences optiques sont un million de fois plus élevées (10¹⁵ Hz) mais les limites spatiales imposées par la longueur d'onde de la lumière (de l'ordre du micron) empêchent la très haute intégration de composants optiques... [Lire la suite](#) »



Harmoniques cohérentes du Laser à Electrons Libres générées à partir d'harmoniques produites dans les gaz. Obtenir un faisceau laser pulsé intense d'impulsions femtosecondes dans le domaine des rayons X demande encore aujourd'hui de nombreux développements scientifiques et technologiques. De tels faisceaux de bonne qualité spectrale et temporelle sont déjà obtenus à partir de la

génération d'harmoniques dans les gaz, mais leur puissance reste aujourd'hui relativement modeste. Il vient d'être montré qu'un dispositif de laser à électrons libres (LEL) peut être utilisé pour amplifier considérablement ($>x1000$) ce type d'impulsions... [Lire la suite »](#)

Bref historique du laser, autour des équipes aujourd'hui à l'IRAMIS Pascal D'Oliveira

Toujours soucieux de développer leurs moyens expérimentaux, les chercheurs du CEA (Commissariat à l'Energie Atomique) de Saclay ont rapidement perçu la révolution amenée par la découverte du laser. Aussi verra-t-on les lasers s'implanter à Saclay dès les années 60. Parmi les premières équipes à s'équiper de lasers, plusieurs contribueront 30 ans plus tard au lancement de la [plateforme SLIC \(Saclay Laser-matter Interaction Center\)](#) !

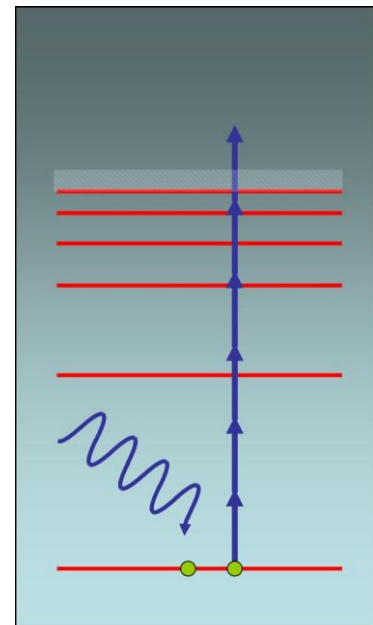
Précédant l'avènement du laser, les chercheurs du CEA Saclay participaient à l'aventure. Dans son livre "How the laser happened ?" [1], Charles H. Townes cite en particulier la collaboration de Jean Combrisson (CEA-Centre d'Etudes de Saclay) avec Arnold Honig au sein du Laboratoire d'Alfred Kastler de l'Ecole Normale Supérieure, et leur contribution à la réalisation d'un maser (avec m pour "microwave") précurseur du laser, par la découverte du système semiconducteur (Si dopé As) présentant des états métastables de longue durée de vie [2].

Au CEA-Saclay, c'est dès les années 1960 que l'équipe de Gérard Mainfray et Claude Manus de l'IRF/SPAS [3] décide de démarrer une activité sur la physique atomique en champ laser intense. Cette équipe s'équipe de lasers à rubis et, rapidement, des premiers lasers en verre dopé au Néodyme fabriqués par la [CILAS](#) [4]. Ces lasers de laboratoire délivrent une énergie par impulsion de l'ordre du Joule en une dizaine de nanosecondes (soit 10^{-8} s, puissance instantanée : 100 MW) ! C'est avec ce type de laser que l'équipe de Saclay fera l'une des premières observations de l'ionisation multiphotonique d'un gaz.

Plusieurs développements s'ensuivent dans les années 1970, qui conduisent à un meilleur contrôle de la cohérence, à l'extension du domaine spectral et à la réduction de la durée d'impulsion à quelques picosecondes ($1\text{ps} = 10^{-12}$ s). Les éclaircements atteints - flux d'énergie par unité de surface - sont alors de 10^{15} W/cm² ! Ils permettent à Pierre Agostini et à ses collègues de publier en 1979 la première observation de l'ionisation multiphotonique "au-dessus du seuil". La course aux très forts éclaircements est désormais lancée entre les meilleurs laboratoires mondiaux. L'équipe de Saclay sait se maintenir aux premiers rangs. A la fin des années 80, elle s'implique dans deux opérations importantes. Tout d'abord, l'équipe et ses partenaires, [LOA \(Laboratoire d'Optique Appliqué, Palaiseau\)](#) et [FOM \(Foundation for Fundamental Research on Matter\) d'Amsterdam](#), montent le premier réseau européen "lasers femtosecondes" ($1\text{fs} = 10^{-15}$ s), une initiative qui permettra le perfectionnement de plusieurs technologies laser.

Dans le même temps, l'équipe construit le premier laser européen basé sur la technologie CPA (Chirped Pulse Amplification), introduite aux Etats-Unis par Gérard Mourou. Ayant à l'origine une puissance de 1 TeraW ($1\text{TW}=10^{12}\text{W}$) à la cadence d'un tir par minute, ce laser UHI (pour Ultra Haute Intensité), a intégré depuis les diverses avancées de la technologie. En 1987, grâce à ces lasers, un processus non linéaire très spectaculaire, la génération d'harmoniques d'ordre élevé (jusqu'à $n \sim 130$...) dans un gaz atomique, est observé simultanément à Chicago et à Saclay.

La constitution de la [plateforme SLIC](#) a résulté de la rencontre du groupe Mainfray avec deux autres équipes. La première, conduite par [Jean-Claude Mialocq](#), dispose depuis le milieu des années 70 de lasers picosecondes (10^{-12} s) puis femtosecondes peu intenses pour l'étude de phénomènes rapides en phase condensée. L'un des domaines d'activité de l'équipe de J.C. Mialocq porte sur l'étude des colorants laser en lien avec le procédé SILVA. La seconde équipe conduite par Jacques Berlande est constituée de physico-chimistes étudiant la cinétique de



Ionisation multiphotonique.

réactions chimiques en phase gazeuse. En réponse aux besoins communs des trois équipes, le programme LUCA sera lancé au début des années 90. Il s'agissait du premier serveur laser femtoseconde mutualisé du DRECAM [5], département à l'origine de l'IRAMIS. La [plateforme SLIC](#) naîtra en 2002 de la réunion au sein d'une structure unique les serveurs laser LUCA et UHI dont la puissance avait été portée à 10 TW en 1997. [SLIC](#) deviendra une "Grande Infrastructure Européenne" en 2003. En 2004, le lancement du serveur PLFA viendra compléter son offre. La dernière évolution majeure a eu lieu en 2008 : le laser UHI a vu sa puissance portée à 100 TW, ce qui en fait l'un des lasers T³ (Table-top Terawatt) les plus puissants en France.

[1] "How the laser happened?", Charles H. Townes, Oxford University Press (1999), ISBN 0-19-51

[2] - Production et amplification de micro-ondes par des procédés atomiques (Production and amplification of microwaves by atomic processes)

J. Combrisson and C.H. Townes, *Onde Electrique*, **36**(356) (1956) 989.

Brief review describing the principles of the maser, the work being done on the ammonia maser at Columbia University, and the possibility of a solid-state version.

- Utilisation de la résonance électronique de spin pour réaliser un oscillateur ou amplificateur à très haute fréquence (Use of electron spin resonance to realize a very high frequency oscillator or amplifier).

J. Combrisson, A. Honig, and C.H. Townes, *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences* (Paris), **242**(20) (1956) 2451.

Induced emission in an electron resonance spectrum is used to produce a microwave oscillator or amplifier. Experimenting with silicon, it was found that the ratio of power furnished by electron emission to that required to excite the cavity was 1/3. In order to obtain free oscillations, experimental details would have to be improved.

[3] IRF/SPAS : Institut de recherche Fondamentale/ Service de Physique des Atomes et des Surfaces

[4] [CILAS : Compagnie Industrielle des Lasers](#)

[5] DRECAM : Département de Recherche sur l'Etat Condensé, les Atomes et les Molécules (Département de recherche dont est issu l'IRAMIS)

Quelques dates clés autour des lasers

1917 : A. Einstein introduit l'idée d'émission stimulée (ou émission induite) pour expliquer le spectre du rayonnement du corps noir.

1921 : [Prix Nobel de Physique attribué à Albert Einstein](#) "for his services to Theoretical Physics, and especially for his discovery of the law of the photoelectric effect"

1953 : Premier maser (acronyme de Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) fabriqué par Charles Townes ([Prix Nobel 1964](#))

1960 : Le 17 mai 1960, Theodore Maiman, des Hughes Research Laboratories, observait pour la première fois le rayon laser (milieu actif : cristal de rubis), basé sur les découvertes d'Albert Einstein, de Charles H. Townes, et s'appuyant sur les travaux d'Alfred Kastler. Voir la publication originale : T. H. Maiman, [Nature 187 \(1960\) 493](#)
LASER = Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

1963 : Premiers hologrammes réalisés par E.N. Leith, J.U. Upatnieks et C.W. Stroke de l'Université du Michigan

1964 : Premier laser à gaz carbonique (infrarouge) par C.Kumar.N. Patel (Continuous-Wave Laser Action on Vibrational-Rotational Transitions of CO₂, C.K.N. Patel, [Physical Review 136\(5A\) \(1964\) A1187](#)).

1966 : [Prix Nobel de Physique attribué à Alfred Kastler](#) "for the discovery and development of optical methods for studying Hertzian resonances in atoms"

1979 : Invention conjointe du disque compact (CD) par Philips, Sony Corporation et Hitachi.

Les lasers de puissance à SACLAY

Pascal D'Oliveira et Bertrand Carré

Au cours des quarante dernières années, les lasers de puissance, qui délivrent l'énergie lumineuse sous la forme d'impulsions de très courte durée, ont permis le développement d'une nouvelle branche de l'optique, dite "non linéaire". Ce domaine de recherche vise à étendre l'étude de l'interaction de la matière et la lumière au cas de champs électromagnétiques très élevés, qui peuvent devenir comparables au champ électrique intra-atomique. On parle d'interaction laser-matière "en champ fort".



Etages amplificateurs du laser UHI (Ultra-Haute Intensité) à Saclay

Dès les années soixante, le groupe de Gérard Mainfray et Claude Manus a compris tout l'intérêt des lasers de puissance pour explorer ces nouveaux domaines. Il s'équipe de lasers à rubis et, rapidement, des premiers lasers en verre dopé au Néodyme fabriqués par la CILAS. Ces lasers ont beau être rudimentaires, ils délivrent quand même une énergie par impulsion de l'ordre du Joule en une dizaine de nanosecondes ! C'est avec ce type de laser que l'équipe de Saclay fera l'une des premières observations de l'ionisation multiphotonique d'un gaz : dans ce processus non linéaire, l'atome qui, en champ faible, ne peut pas être ionisé par l'absorption d'un seul quantum d'énergie - le photon du champ laser - est ionisé en champ fort par absorption simultanée de plusieurs quanta. L'équipe de Saclay va s'illustrer particulièrement dans l'étude de ce phénomène en associant étroitement théoriciens et expérimentateurs.

Plusieurs développements s'ensuivent dans les années 1970, qui conduisent à un meilleur contrôle de la cohérence, à l'extension du domaine spectral et à la réduction de la durée d'impulsion à quelques picosecondes. Les éclaircissements atteints - flux d'énergie par unité de surface - sont alors de 10^{15} W/cm² ! Ils permettent à P. Agostini et à ses collègues de publier en 1979 la première observation de l'ionisation multiphotonique « au-dessus du seuil ». Dans ce processus, l'atome absorbe un nombre de photons supérieur à celui qui correspond au seuil d'ionisation, les quanta d'énergie en excès étant captés par l'électron éjecté.

La course aux très forts éclaircissements est désormais lancée entre les meilleurs laboratoires mondiaux. L'équipe de Saclay sait se maintenir aux premiers rangs. A la fin des années 80, elle s'implique dans deux opérations importantes. Tout d'abord, l'équipe et ses partenaires, LOA et FOM d'Amsterdam, montent le premier réseau européen « lasers femtosecondes », une initiative qui permettra le perfectionnement des plusieurs technologies laser. Dans le même temps, l'équipe construit le premier laser européen basé sur la technologie « CPA » (Chirped Pulse Amplification), introduite aux Etats-Unis par G. Mourou. Ayant à l'origine une puissance de 1TW ($1\text{TW}=10^{12}\text{W}$) à la cadence d'un tir par minute, ce laser UHI (pour Ultra Haute Intensité), a intégré depuis les diverses avancées de la technologie : il délivre des impulsions de 10 TW à la cadence de 10 Hz.

En 1987, grâce à ces lasers, un processus non linéaire très spectaculaire, la génération d'harmoniques d'ordre élevé dans un gaz atomique, est observé simultanément à Chicago et à Saclay. Ce phénomène se produit lorsqu'un faisceau laser très intense est focalisé dans un jet atomique de gaz rare, par exemple de néon. Dans un premier temps, ce déferlement de lumière "secoue" les électrons qui absorbent l'énergie des photons reçus et s'éloignent du noyau auquel ils sont liés. Dans un deuxième temps, ces électrons retournent à leur niveau d'énergie de départ en réémettant l'énergie supplémentaire qu'ils avaient absorbée. Mais les photons ainsi restitués ne sont pas semblables aux photons d'origine : leur énergie est un multiple entier de celle des photons incidents. Les atomes se sont donc comportés en définitive comme des convertisseurs de fréquence : leurs électrons ont absorbé chacun un grand nombre de photons incidents mais ne réémettent qu'un seul "gros photon" plus énergétique. Des harmoniques d'ordre élevé sont ainsi engendrées, jusqu'à atteindre des fréquences proches de celles des rayons X.

Enfin, les éclaircissements supérieurs à $10^{17}\text{W}/\text{cm}^2$ qui définissent le domaine UHI ont permis à l'équipe de Saclay d'aborder la physique des plasmas produits par lasers, qui restent toujours en 2010 un objet d'étude privilégié. C'est dans ce cadre que l'équipe s'attachera à produire le phénomène d'autofocalisation relativiste d'un faisceau laser dans un milieu fortement ionisé, et qu'elle y parviendra sur la chaîne laser P102 de la DAM.

Par ses travaux sur les lasers de puissance et l'interaction laser-matière en champ fort, le groupe de G. Mainfray a fondé à Saclay une tradition d'excellence qui ne s'est pas démentie. Elle se confirme même aujourd'hui, puisque plusieurs serveurs laser femtosecondes sont installés à Saclay (DSM/IRAMIS) qui, avec des caractéristiques variées d'énergie et de longueur d'onde, répondent aux besoins des différentes communautés de chercheurs. Il est donc légitime de dire que ce pôle laser pluridisciplinaire, fortement lié à ses voisins en Ile-de-France, en France et en Europe, doit ainsi beaucoup aux pionniers de Saclay.