

# L'Institut de la Lumière Extrême

**Danièle Hulin** (daniele.hulin@recherche.gouv.fr)

Chargée de mission pour les Très Grandes Infrastructures de Recherche à la Direction Générale de la Recherche et de l'Innovation (MESR)

Un nouveau domaine de recherche s'est ouvert aux physiciens, celui de la matière (vide y compris !) soumise à une intensité laser extrêmement forte, où les comportements habituels cessent d'être valables et où de nouveaux processus sont découverts.

L'Institut de la Lumière Extrême (ILE), sur le plateau de Saclay, construit un ensemble exceptionnel de lasers ultra-intenses pour permettre aux chercheurs d'explorer ces nouvelles frontières.

L'Institut de la Lumière Extrême (ILE) est un projet ambitieux qui se met en place en ce moment sur le plateau de Saclay. Il englobera plusieurs lasers de pointe ayant des caractéristiques poussées au-delà de leurs limites actuelles en termes de **courte durée** et de **puissance élevée**. Cela ouvrira le champ d'une nouvelle physique comme, par exemple, celle du régime ultra-relativiste où les ions tout comme les électrons seront accélérés par le laser à des vitesses très proches de celle de la lumière. Cette interaction laser-matière à ultra-haute intensité touche à la physique des plasmas, des particules, à la physique nucléaire et peut-être un jour à celle du vide pour les plus fortes intensités. Elle permettra de produire des rayonnements X aux propriétés uniques, d'accélérer des faisceaux de particules très énergétiques, et aura des applications dans le domaine médical.

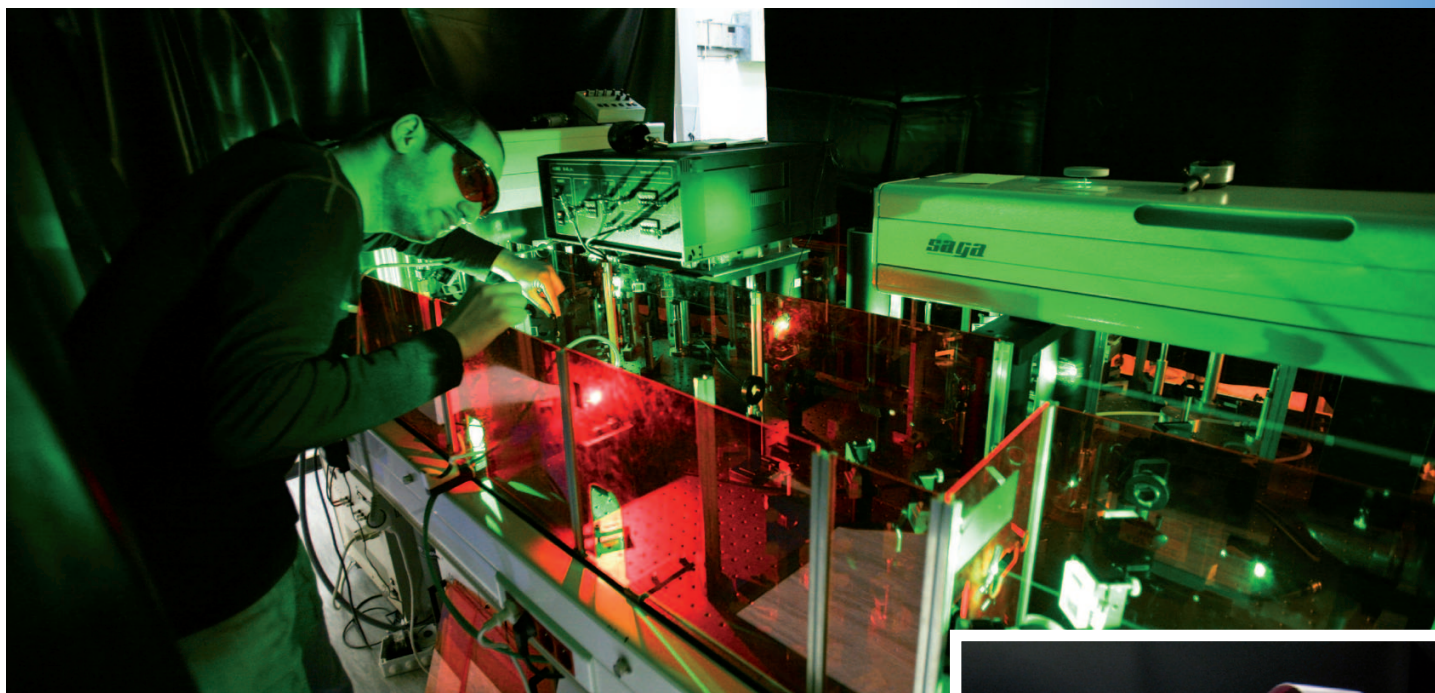
## Les lasers de l'ILE

Le « vaisseau amiral » de l'ILE sera le laser **Apollon**, qui délivrera des impulsions dont la puissance crête ira jusqu'à 10 petawatts (10 PW =  $10^{16}$  watts). Au point de focalisation, l'intensité crête sera de presque  $10^{23}$  W/cm<sup>2</sup>. Ces chiffres sont trop grands pour nous parler facilement, mais il faut réaliser que le champ électrique oscillant de la lumière y aura une valeur de 10 TV/m, soit plus de mille fois le champ coulombien dans l'atome d'hydrogène !! Au moment de son inauguration, ce laser battra probablement le record mondial de puissance.

Le laser Apollon sera basé sur un oscillateur (laser délivrant des impulsions ultracourtes de durée 15 femtosecondes [ $1 \text{ fs} = 10^{-15}$ s]) à une longueur d'onde autour de 800 nm), suivi par des amplificateurs à cristaux de saphir dopé au titane (TiSa) suivant la technique de l'impulsion étirée (CPA).

Puissances de dix	Nombre	Symbole
$10^{-18}$	0,000 000 000 000 000 001	a (atto)
$10^{-15}$	0,000 000 000 000 001	f (femto)
$10^{-12}$	0,000 000 000 001	p (pico)
$10^{-9}$	0,000 000 001	n (nano)
$10^{-6}$	0,000 001	$\mu$ (micro)
$10^{-3}$	0,001	m (milli)
$10^0$	1	
$10^3$	1000	k (kilo)
$10^6$	1 000 000	M (mega)
$10^9$	1 000 000 000	G (giga)
$10^{12}$	1 000 000 000 000	T (tera)
$10^{15}$	1 000 000 000 000 000	P (peta)

Mes remerciements à Antoine Rousse (LOA) pour les photos et dessins de cet article qu'il m'a envoyés.



Vue de la première partie (*front end*) d'un laser femtoseconde intense (photo LOA-ENSTA-ParisTech).

Ce laser est construit pour des expériences à ultra-haute intensité, alors que le Laser Mégajoule (LMJ) en Aquitaine est dédié aux études à très haute énergie. Avec sa puissance crête de 10 PW (10 millions de fois celle d'une centrale nucléaire), le laser Apollon aura 20 fois la puissance du LMJ, tout en ayant une énergie par impulsion beaucoup plus faible (150 joules au lieu de 1,8 MJ, mais en une quinzaine de femtosecondes contre quelques nanosecondes pour le LMJ), en occupant une seule salle au lieu d'un très grand bâtiment. Cette différence des énergies par impulsion a aussi pour conséquence des taux de répétition très différents, un tir par minute pour Apollon contre un tir par jour pour le LMJ. Alors que ce dernier sera utilisé pour des expériences thermonucléaires à des fins militaires et civiles, Apollon sera dédié à la physique fondamentale de l'interaction laser-matière à ultra-haute intensité et à la génération de rayonnements (rayons X, faisceaux de particules). Les deux installations sont donc tout à fait complémentaires et non concurrentes.

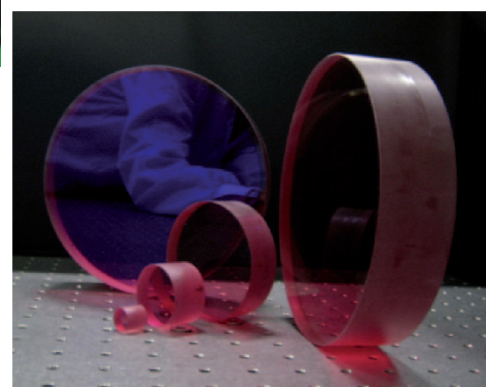
Pour construire un laser comme Apollon, il faut surmonter un certain nombre de verrous technologiques importants. Les travaux menés pour ce faire ont déjà donné lieu à quelques avancées spectaculaires : gros cristaux de saphir dopé au titane pour le milieu amplificateur (fig. 1), cristaux deux fois plus efficaces pour convertir en vert l'infrarouge produit par les lasers NdYAG de pompe, mobilisation des industriels pour mettre au point des gros lasers de pompe.

Les réseaux optiques, servant en bout de chaîne d'amplification à recomprimer l'impulsion à sa durée minimale, représentent encore une difficulté importante.

Apollon est en construction grâce à un Contrat de Projet État-Région (CPER) 2007-2013 et devrait pouvoir délivrer ses premiers tirs fin 2014, avant une mise en exploitation pour les utilisateurs du monde entier.

L'institut ILE comporte également d'autres lasers, qui seront en fonction courant 2011.

- Le laser **ELFIE** à l'École polytechnique-ParisTech. Il délivre à faible taux de répétition des impulsions longues (nanosecondes et picosecondes) de forte énergie. Il peut être utilisé simultanément avec une impulsion de quelques joules ayant une durée de 100 fs (10 TW) basée sur un principe d'amplification différent, l'OPCPA (amplification paramétrique), pour l'étude des plasmas chauds, le traitement des matériaux et l'astrophysique de laboratoire.
- Le laser **LUIRE** (0,5 PW) à l'ENSTA-ParisTech, commencé durant le précédent CPER. C'est, comme le laser Apollon, un laser à amplification par cristaux de TiSa, mais de plus faible puissance crête (impulsions de 15 joules d'une durée de 30 fs) et de récurrence 0,1 Hz. Ce laser Luire est attendu avec impatience sur le plateau de Saclay. Il permettra de dépasser le plafond actuel de puissance qui est de 0,1 PW et commencera, en attendant



1. « Photo de famille » des cristaux de saphir dopé au titane (« TiSa ») prévus pour obtenir 300 joules avant compression.

Les cristaux font respectivement 15, 40, 80, 175 et 175 mm de diamètre. Le TiSa est utilisé pour ses propriétés remarquables : grande largeur spectrale de la bande de gain (indispensable pour les impulsions courtes), durée de vie des états excités adéquate, grande conductivité thermique pour évacuer la chaleur...

Apollon, à concrétiser les avancées prévues théoriquement pour l'accélération des particules et la génération des faisceaux X.

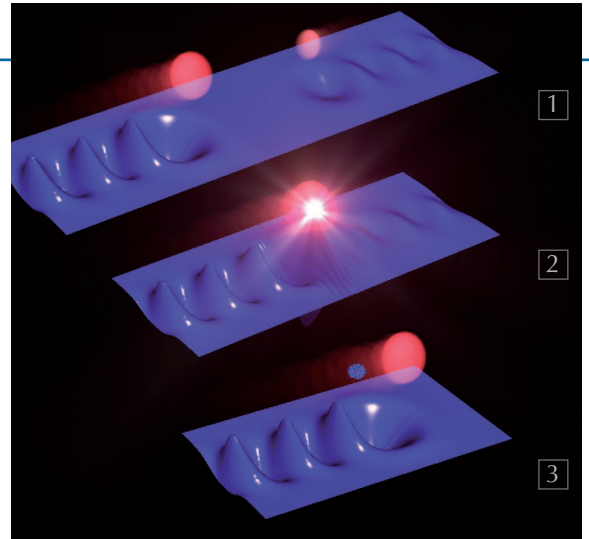
Mentionnons, autour de l'ILE, les installations laser du plateau de Saclay déjà existantes avant le démarrage du projet : LASERIX (laser dans le domaine XUV) de l'Université Paris-Sud, LULI 2000 à l'École polytechnique, la « Salle jaune » (100 TW) à l'ENSTA et UHI100-IRAMIS au CEA. Comme la plupart des laboratoires de lasers intenses du plateau de Saclay font partie du programme européen Laserlab-Europe, les caractéristiques détaillées de ces lasers peuvent se trouver sur :

[www.laserlab-europe.eu/transnational-access/access-facilities/](http://www.laserlab-europe.eu/transnational-access/access-facilities/)



## ► Injection optique d'électrons dans l'onde plasma pour obtenir un faisceau d'électrons accéléré

- 1 • L'impulsion laser principale (en rouge) arrive de gauche et crée un sillage dans le plasma (en bleu : la densité d'électrons), car elle déplace seulement les électrons ensuite rappelés par les ions (peu déplacés par l'impulsion à cette échelle de temps ultracourte), d'où les oscillations plasma. Ce déplacement de charges crée juste derrière l'impulsion une zone de fort champ électrique qui peut accélérer des électrons. Une seconde impulsion laser plus faible (petite boule rouge) arrive de la direction opposée.
- 2 • La petite impulsion laser venant de droite déphase le mouvement oscillant de nombreux électrons.
- 3 • Les électrons déphasés (représentés par une petite boule bleue) sont ensuite accélérés dans le sillage lié à l'impulsion principale, au lieu de participer aux oscillations plasma. Ce processus induit est beaucoup plus efficace que celui reposant sur un déphasage spontané par collisions.



>>>

## La recherche dans l'Institut de la Lumière Extrême

### Les faisceaux d'électrons accélérés

Les accélérateurs à plasma tirent leur effet des très forts champs électriques dans l'axe du faisceau laser, créés par les gradients de charges (électrons et ions du plasma) produits par l'impulsion laser (voir encadré). Un champ accélérateur bien au-delà du gigavolt/m a déjà été mesuré sur plusieurs millimètres. Par comparaison, le champ accélérateur dans les cavités du LHC au CERN est environ mille fois plus faible (5 megavolts/m). Pour pouvoir arriver à des bouffées d'électrons jusqu'à 100 GeV, il faudra étudier le guidage du laser sur une distance suffisante, l'injection des électrons, les courants d'électrons dans les plasmas, les accélérateurs multi-étages... À plus ou moins long terme, cette technique pourrait être une alternative intéressante aux accélérateurs classiques où le champ accélérateur est souvent limité par les tensions de claquage.

### L'accélération relativiste des ions

Une lumière très intense et brève, focalisée sur une cible mince solide, provoque dans un premier temps une expulsion d'électrons, créant ainsi un fort champ électrique perpendiculaire aux surfaces. Ce champ ionise les atomes près de la surface et les accélère jusqu'à des énergies qui peuvent être beaucoup plus grandes que celle des électrons (fig. 2).

Actuellement, l'état de l'art pour les protons est d'une dizaine de MeV pour

des lasers de 0,1 PW. Il faudra atteindre des énergies plus grandes, au moins 200 MeV, et contrôler la forme du faisceau et sa reproductibilité, pour que ces ions puissent servir dans le traitement des tumeurs cancéreuses (hadronthérapie). Il sera aussi nécessaire d'augmenter le taux de répétition.

Les faisceaux de particules (électrons, ions et même neutrons) serviront aussi à étudier les plasmas denses et chauds, à reproduire des processus observés en astrophysique, à étudier la dynamique des dommages dans les matériaux irradiés...

### Les sources femtosecondes de rayons X

D'année en année, on voit des progrès importants dans la génération de rayonnements X à partir de lasers femtoseconde dans le visible focalisés sur une cible solide ou dans un gaz. Cela a d'abord été des sources incohérentes issues de plasmas chauds, puis les harmoniques d'ordres élevés dans les gaz, maintenant des processus d'émission nouveaux (miroirs à plasma, radiation-betatron, diffusion Compton, etc...). Les énergies des photons vont de 30 eV à des dizaines de keV, les énergies par impulsion vont de quelques nanojoules à quelques millijoules et la durée des impulsions peut descendre dans le domaine des attosecondes (1 as = 1/1000 de fs). Une des propriétés remarquables de ces sources est d'être parfaitement synchrone avec le laser principal, ce qui est nécessaire pour des expériences résolues en temps du type

pompe-sonde<sup>(1)</sup>, de diffraction par exemple si on veut étudier les étapes de la fusion d'un solide excité par laser.

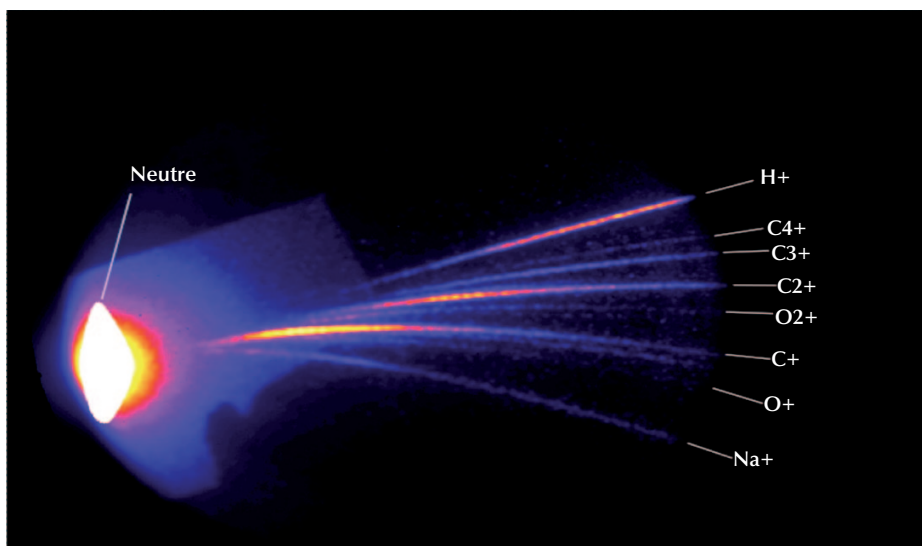
Les sources pulsées de rayons X sont en elles-mêmes un sujet d'étude, mais sont également utilisées comme une sonde extrêmement intéressante des processus dynamiques dans la matière. Elles sont complémentaires des sources de rayonnement synchrotron par l'excellente résolution temporelle qu'elles peuvent apporter. La figure 3 montre une radiographie X qu'on peut obtenir avec un rayonnement synchrotron, résultat qu'il serait utile de reproduire et disséminer ailleurs que dans les grosses installations que sont les synchrotrons.

### La physique photonucléaire

Des rayonnements  $\gamma$  seront produits par rétrodiffusion Compton d'électrons accélérés rencontrant un faisceau laser intense. Ces photons, dans la gamme des MeV, sont bien adaptés pour le domaine d'énergie des excitations nucléaires. On pourra ainsi étudier les transitions à résonance dans les noyaux, la relaxation résolue en temps des états excités, la production de faisceaux intenses de neutrons, les phénomènes à l'interface physique atomique-physique nucléaire...

### La physique à ultra-haute intensité, dite « physique exotique »

Les photons des lasers à très haute intensité pourraient être sensibles aux particules de faible moment associées à la matière noire.



## 2. Observation expérimentale de la distribution en masse et vitesse des ions émis par la face arrière d'une feuille irradiée par un laser intense.

Les particules arrivent vers l'observateur et traversent une zone de champs électrique et magnétique (parabole de Thomson). Pour une même espèce, les particules les moins déviées sont les plus énergétiques.

L'électrodynamique quantique (QED) et les effets de polarisation du vide pourraient aussi devenir influents pour des intensités approchant la limite critique de Schwinger (intensité nécessaire pour créer une paire de particules dans le vide) correspondant à  $10^{29} \text{ W/cm}^2$ . Certes, l'intensité maximum d'Apollon ne sera « que » de  $10^{23} \text{ W/cm}^2$ , mais des techniques de compression d'impulsion utilisant des collisions électron-photon pourraient aider à franchir ce *gap*. On pourra alors créer des paires  $e^+e^-$  à partir du vide (fig. 4).

Pour plus de détails, consultez le site : [www.extreme-light-infrastructure.eu/High-field\\_5\\_2.php](http://www.extreme-light-infrastructure.eu/High-field_5_2.php)

## Comment se situe l'ILE, géographiquement et internationalement ?

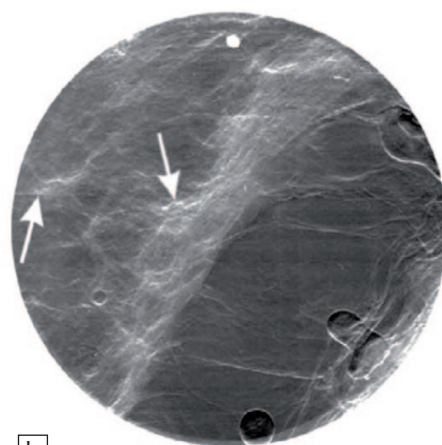
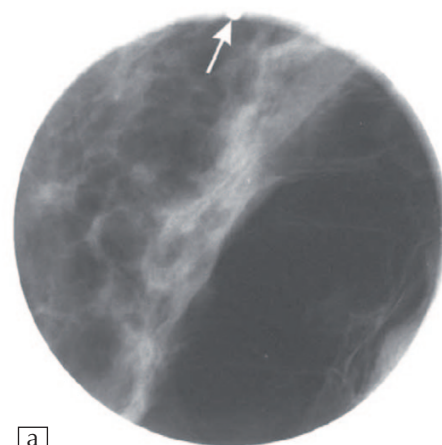
Cet Institut de la Lumière Extrême a pour tutelles le CNRS, l'École polytechnique-ParisTech, l'ENSTA-ParisTech, l'Institut d'Optique (IOGS) et l'Université Paris-Sud ; elles pourraient être rejointes par le CEA. L'Institut est issu d'une demande au CPER 2007-2013 conjointe entre 13 laboratoires du plateau de Saclay (LULI, LOA, LCFIO, LIXAM, LLR, IRAMIS, LOB, CPhT, LSI, LPGP, LAL, LILM, DOTA), coordonnée par Gérard Mourou, devenu directeur de l'ILE. La dotation du CPER (autour de 20 M€) a été principalement utilisée pour la construction du laser Apollon ; un projet

d'Equipex<sup>(2)</sup> vient d'être accepté pour financer les équipements des expériences.

La localisation de l'ILE se doit d'être sur le plateau de Saclay où se trouvent pratiquement tous les laboratoires participant au projet, mais où ? Après de longs débats, le site de l'Orme des merisiers a été choisi. Le laser Apollon et les expériences qui l'utiliseront seront hébergés dans les bâtiments et le tunnel de l'ancien accélérateur linéaire (ALS) du CEA, actuellement désaffecté et décontaminé, tandis que LUIRE et ELFIE resteront pour l'instant respectivement à l'ENSTA et à l'École polytechnique. Le choix du site d'Apollon a été guidé par la possibilité d'implanter plus tard dans le tunnel d'importantes installations d'accélération par laser, en liaison avec l'IN2P3, bien établi à Orsay, et avec l'IRFU (CEA).

L'ILE n'est pas le seul projet de ce type en Europe. Il a un grand frère, le projet "Extreme Light Infrastructure" (ELI), proposé par Gérard Mourou, et qui a été retenu sur la feuille de route de l'ESFRI (European Strategic Forum for Research Infrastructures). Le programme d'ELI est de même nature que l'ILE, mais encore plus ambitieux. À la fin de la phase préparatoire (décembre 2010), trois pays se sont portés candidats pour héberger chacun un des aspects d'ELI, qui sera donc une grande infrastructure reposant sur trois « piliers » et potentiellement quatre :

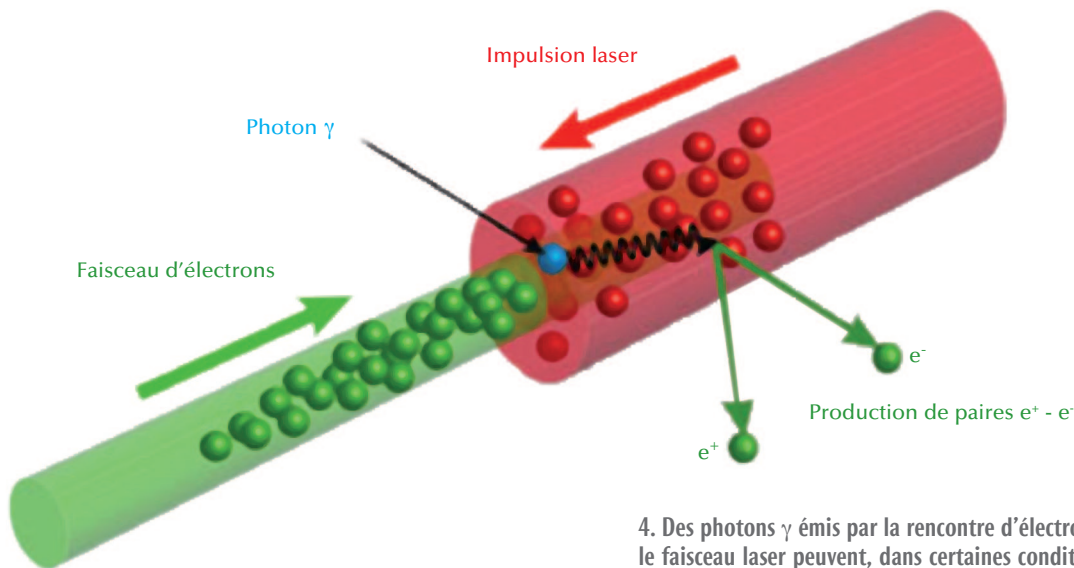
- en République tchèque, dans la banlieue de Prague, le pilier **ELI-Beamlines**



## 3. Comparaison de mammographies X.

(a) Radiographie conventionnelle d'un sein avec l'appareillage Siemens Mammomat 3000.

(b) Le même sein vu en contraste de phase en rayonnement synchrotron avec des photons de 25 keV (les meilleurs contraste et résolution spatiale permettent de détecter des tumeurs de 1 mm au lieu de 1 cm) (échelle x 1) (A. Bravin, ESRF).



4. Des photons  $\gamma$  émis par la rencontre d'électrons accélérés avec le faisceau laser peuvent, dans certaines conditions, donner lieu à la production de paires électron-positron.

(Schéma extrait du site d'ELI : [www.extreme-light-infrastructure.eu](http://www.extreme-light-infrastructure.eu))

### >>>

**facilities** sera dédié à la production de faisceaux à impulsions ultracourtes de particules énergétiques (10 GeV) et de radiations X et  $\gamma$  (jusqu'à quelques MeV) à partir d'accélérateurs à plasma pour des applications scientifiques et sociétales. Pour cela, il utilisera probablement plusieurs lasers de type Apollon 10 PW ;

- en Hongrie, à Szeged, le **pilier ELI-Attosecond facility** sera consacré aux dynamiques électroniques ultrarapides dans les atomes, les molécules, les plasmas et les solides, grâce à des impulsions attosecondes. Il s'intéressera également aux très hautes intensités, mais à des temps ultracourts ;

- en Roumanie, à Magurele, le **pilier ELI-Nuclear Physics Facility** s'intéressera à la physique nucléaire avec laser. Dans ce but, une source intense de rayons  $\gamma$  est prévue, obtenue en couplant un accélérateur de particules de haute énergie avec un ou deux lasers à très haute intensité de type Apollon 10 PW (voir paragraphe ci-dessus sur la physique photonucléaire).

Les trois pays concernés, nouveaux États membres de l'Union européenne, bénéficieront de fonds structureaux, leurs demandes étant respectivement de 260 M€, 174 M€ et 280 M€ (un montant plus de 10 fois supérieur à celui de l'ILE !!).

Le quatrième pilier d'ELI, celui de la physique exotique (fig. 4), nécessite la plus haute des intensités laser. Pour l'instant aucun pays ne s'est encore porté candidat pour l'héberger, attitude de prudence vu le grand nombre d'inconnues techniques encore existantes.

## Conclusion

Quelles seront les prochaines étapes ? La physique du laser à extrêmement haute intensité reste une « terra incognita » qu'il sera passionnant d'explorer, mais la consolidation des performances des lasers et les budgets nécessaires sont pour l'instant des freins puissants. Par ailleurs, même si les résultats qui seront obtenus grâce aux lasers de l'ILE seront des « premières » qui mettront en évidence de nouveaux processus, seule l'augmentation du taux de répétition permettra des applications sociétales à grande échelle. Le pompage par diodes est probablement une des clés de ce futur et déjà plusieurs laboratoires y travaillent.

En attendant, l'Institut de la Lumière Extrême comportera sous peu un ensemble de sources laser ultra-intenses et ultra-brèves dont les performances ne seront égalées à moyen terme par aucun autre laser au monde et qui produira des sources secondaires de rayonnement X ou de faisceaux de particules (électrons, protons), là encore, aux performances exceptionnelles. Il y a là une opportunité qui devra être pleinement exploitée avant la réalisation du projet européen ELI ou la possible construction d'un laser 10 PW au Rutherford Appleton Laboratory (UK). La communauté scientifique du plateau de Saclay et d'Orsay, avec une expertise reconnue internationalement dans les domaines de l'interaction laser-matière à ultra-haute intensité et de l'accélération de particules, y est bien préparée. ■

## En savoir plus

- [www.cea.fr/technologies/les\\_lasers\\_au\\_cea/l\\_interaction\\_laser-matiere](http://www.cea.fr/technologies/les_lasers_au_cea/l_interaction_laser-matiere)
- [www.extreme-light-infrastructure.eu/](http://www.extreme-light-infrastructure.eu/)
- [http://ec.europa.eu/research/infrastructures/index\\_en.cfm?pg=eli](http://ec.europa.eu/research/infrastructures/index_en.cfm?pg=eli)
- [ec.europa.eu/research/infrastructures/index\\_en.cfm?pg=esfri](http://ec.europa.eu/research/infrastructures/index_en.cfm?pg=esfri)
- V. Malka *et al.*, "Principles and applications of compact laser-plasma accelerators", *Nature Physics* **4** (2008) 447.
- C. Thaury *et al.*, "Coherent dynamics of plasma mirrors", *Nature Physics* **4** (2008) 631.
- P. Balcou et D. Hulin, « Des attosecondes au petawatt, la lumière extrême », *Bulletin de la SFP hors série / Le BUP* **875** (2005) 11.
- A. Bravin *et al.*, "High-resolution CT by diffraction enhanced x-ray imaging: mapping of breast tissue samples and comparison with their histo-pathology", *Phy. Med. Biol.* **52** (2007) 2197.
- M. Decroisette, « La fusion thermonucléaire par laser », *Reflète de la physique* **21** (2010) 35.
- S. Forget *et al.*, « Les différents lasers : un tour d'horizon », *Reflète de la physique* **21** (2010) 18.
- T. Ruchon *et al.*, « Sources cohérentes de laboratoire dans l'extrême ultraviolet », *Reflète de la physique* **21** (2010) 30.
- D. Hulin, « La feuille de route des très grandes infrastructures de recherche », *Reflète de la physique* **16** (2009) 30.
- F. Quéré et P. Martin, « Vers l'optique à ultra-haute intensité : l'exemple des miroirs plasmas », *Reflète de la physique* **19** (2010) 14.

(1) Expérience consistant à exciter un phénomène avec une impulsion dite de pompe, et à venir sonder le système à un instant ultérieur avec une impulsion dite de sonde.

(2) Projet Équipement d'Excellence du programme « Investissements d'avenir », géré par l'Agence Nationale de la Recherche.