

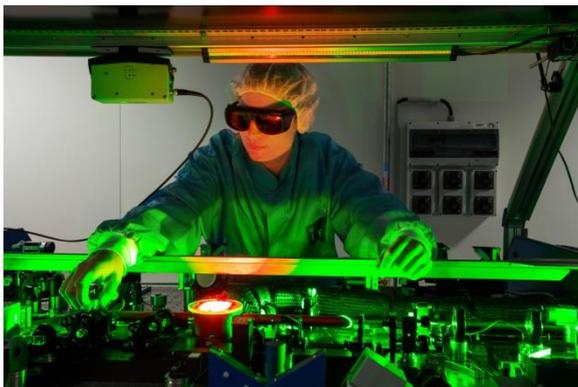


DOSSIER DE PRESSE

Naissance du laser Apollon : vers un record mondial de puissance en 2016

Visite de presse et inauguration

Mardi 29 septembre 2015



© Jérémy Barande/Permission to use granted by Newport Corporation.
All right reserved.



© Jérémy Barande/LUL/École polytechnique/CNRS Photothèque

Contact

Presse CNRS | Véronique Etienne | T 01 44 96 51 37 | veronique.etienne@cnrs-dir.fr



www.cnrs.fr



SOMMAIRE

> Invitation presse	3
> Les chercheurs rencontrés	5
> Apollon, vers le laser le plus puissant au monde	6
→ Apollon en chiffres	
- Fonctionnement	7
→ La lumière laser	
○ La chaîne laser	
→ Caractéristiques des quatre faisceaux produits	
○ Les salles expérimentales	
→ Un défi technique !	
- Réalisation	11
○ Apollon, au cœur de Cilex, une communauté interdisciplinaire autour de la lumière extrême	
○ Financements	
- Le site d'accueil : le bâtiment de l'ancien accélérateur linéaire de Saclay	13
○ Une infrastructure aux caractéristiques exceptionnelles	
○ Les aménagements pour accueillir Apollon	
- Calendrier	14
> Les objectifs scientifiques	15
- Produire des sources secondaires de rayonnements et de particules	15
- Explorer de nouveaux pans de la physique	15
○ Physique relativiste	
○ Physique attoseconde	
○ Physique du vide	
- Simuler des phénomènes astrophysiques en laboratoire	16
- Analyser la matière à des échelles ultra-fines	16
- Des pistes à plus long terme	16
○ Nouvelles technologies d'accélération pour les accélérateurs du futur	
○ Applications médicales	
○ Traitement des déchets nucléaires	
> Contexte	18
- Les lasers de puissance	18
- Apollon parmi les installations existantes	20
- L'excellence française en matière de lasers	21
○ L'industrie française des lasers et de l'optique au meilleur niveau mondial	
○ La recherche scientifique française sur les lasers reconnue à l'international	
- Apollon, un jalon du projet européen <i>Extreme Light Infrastructure (ELI)</i>	22
> Le LULI, pilote et gestionnaire d'Apollon	23
> Ressources	24
- Planche photos	24
- Liens pour en savoir plus	27
- Article de CNRS le Journal	28



INVITATION PRESSE | PARIS | 21 SEPTEMBRE 2015

Naissance du laser Apollon : record mondial de puissance attendu en 2016

Visite de presse

Mardi 29 septembre 2015 à 15h00

**CEA – l'Orme des Merisiers
Bâtiment 704
91190 Saint Aubin**

Fin 2016, Apollon deviendra le premier laser au monde à atteindre la puissance de 5 pétawatts¹ (PW), plusieurs fois celle des meilleurs lasers actuels. Cette installation, portée par le CNRS en partenariat avec l'École polytechnique, le CEA et d'autres institutions², est même conçue pour atteindre 10 PW. La chaîne laser a été installée dans l'ancien bâtiment de l'accélérateur linéaire de Saclay, au cœur de la nouvelle Université Paris-Saclay. Elle sera complétée par deux salles expérimentales où seront explorées les frontières de la physique. Nous vous invitons à découvrir ces premières installations au cours d'une visite de presse le mardi 29 septembre 2015 à 15h, qui précédera leur inauguration officielle le même jour à 17h.

Cette année internationale de la lumière proclamée par l'ONU marque la naissance d'Apollon, qui deviendra l'an prochain le laser le plus puissant du monde, avec ses 5 PW (1/35^e de la puissance solaire reçue par la Terre). À terme, ce laser devrait atteindre une puissance de 10 PW. Grâce à son intensité lumineuse extrême, il produira des faisceaux de particules et des rayonnements aux paramètres inégalés, permettant de repousser les limites de la recherche fondamentale. Ouvert à la communauté scientifique nationale et internationale à l'horizon 2018, et intégré dans le Centre interdisciplinaire lumière extrême (Cilex), Apollon sera un instrument de choix pour explorer des domaines nouveaux, certains jusqu'ici essentiellement théoriques, de la physique relativiste³ à la physique du vide, en passant par de nouvelles technologies d'accélération des particules et d'analyse de la matière.

¹ 1 PW vaut 1 million de milliards de watts.

² Institut d'Optique Graduate School, ENSTA ParisTech, Université Paris-Sud, UPMC.

³ Fonctionnement de la matière lorsque les particules se déplacent à une vitesse proche de celle de la lumière.



www.cnrs.fr



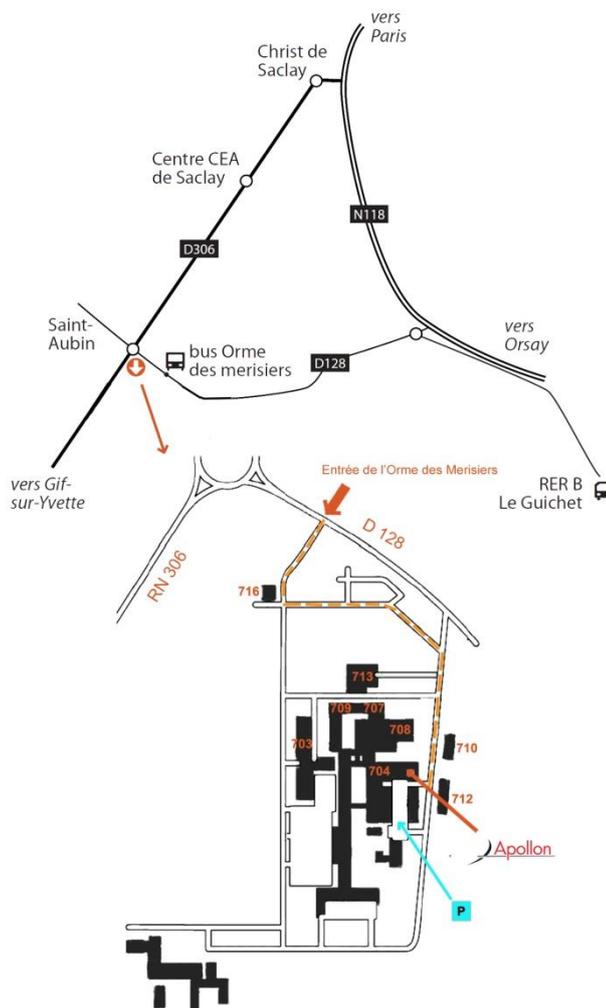
Visite de presse le mardi 29 septembre à 15h

Accès :

- Départ collectif à 14h15 depuis Paris (Denfert-Rochereau). Retour au choix à 17h (avant l'inauguration officielle) ou à 19h (après l'inauguration).
- Par vos propres moyens : voir le plan ci-dessous.

Inscription : obligatoire d'ici le lundi 28 septembre midi. Pensez à vous munir d'une pièce d'identité : un contrôle sera effectué à l'entrée du site.

Contact presse CNRS | Véronique Etienne | T 01 44 96 51 37 | veronique.etienne@cnrs-dir.fr



En transports en commun, 2 options :

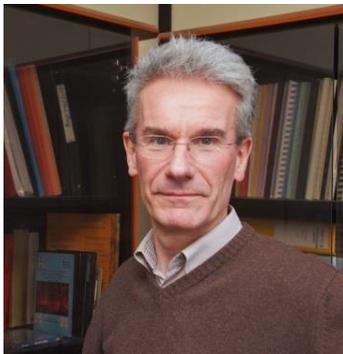
RER B, station Le Guichet, puis bus 9 à la gare routière (départ toutes les 20-25 minutes, trajet 15 minutes).

RERB, station Massy-Palaiseau, puis bus 91.06B, 91.06C ou 91.10 (trajet 20 minutes).



LES CHERCHEURS RENCONTRÉS

François Amiranoff, directeur du projet Apollon

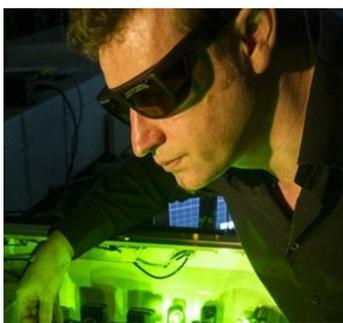


Directeur de recherche CNRS au Laboratoire d'utilisation des lasers intenses (CNRS/École polytechnique/CEA/UPMC), **François Amiranoff** en a été le directeur de 2003 à 2014. Spécialiste de la physique des plasmas créés par lasers de puissance, il a notamment travaillé dans le cadre de la physique de la fusion inertielle dans le but de la production d'énergie et a obtenu la médaille d'argent du CNRS pour ses travaux sur l'accélération laser de particules, en 1998. Il est responsable depuis 2011 du projet Apollon d'installation laser et expérimentale multi-pétawatt dans le cadre d'une large collaboration autour de la lumière extrême sur le plateau de Saclay.

© photothèque École polytechnique / Ph. Lavialle

Contact : T 01 69 33 53 01 / 01 44 27 75 48 - francois.amiranoff@polytechnique.fr

Pascal Monot, membre de l'équipe de direction du projet Apollon



Pascal Monot est chercheur au CEA au sein du Laboratoire interactions dynamique et laser (LIDyL). Il participe aux recherches consacrées à l'interaction laser-plasma à ultra-haute intensité. Il s'agit en particulier d'étudier de quelle façon des impulsions lumineuses à la fois extrêmement brèves et très puissantes peuvent exciter la matière, stimuler des dynamiques ultra-rapides et de grande amplitude pour conduire à l'émissions de particules rapides et de rayonnement secondaire. Il s'investit également dans l'exploitation de ces nouvelles sources aux propriétés originales comme outils d'exploration dans des domaines de recherche variés. Il représente cette communauté

scientifique lumière extrême au sein de l'Université Paris-Saclay.

Contact : T 01 60 08 10 35 - pascal.monot@cea.fr



APOLLON, VERS LE LASER LE PLUS PUISSANT AU MONDE

Apollon est un laser conçu pour atteindre la puissance encore inégalée de 10 pétawatts (PW)¹. Fin 2016, lorsqu'il atteindra la puissance de 5 PW, il sera déjà le laser le plus puissant au monde². En 2018, l'installation complète ouvrira à la communauté internationale, pour des recherches sur la physique à très haute intensité : générer des sources de protons ou d'électrons accélérés à des vitesses proches de celle de la lumière, étudier l'interaction rayonnement-matière à des intensités extrêmes ou reproduire en laboratoire des mécanismes astrophysiques violents (comme les supernovae, les pulsars ou les sursauts gamma), sonder la matière avec une résolution temporelle ultime, ou encore explorer les propriétés physiques du vide. Avec, à la clé de ces recherches, des applications sociétales potentielles en médecine (imagerie, traitement des cancers) ou dans le traitement des déchets nucléaires.

Pour atteindre ce record de puissance³, Apollon combinera une énergie élevée (150 joules) et une durée d'impulsion extrêmement courte (15 femtosecondes⁴).

Apollon en chiffres

Puissance théorique : 10 pétawatts (5 PW financés).

Energie finale : 150 J.

Durée d'impulsion : 15 fs.

Intensité du faisceau : $> 10^{22}$ W/cm².

Champ électrique : $\approx 3 \cdot 10^{14}$ V/m.

Champ magnétique : $\approx 10^6$ T.

Energie des électrons dans le champ laser : ≈ 35 MeV.

Pression due au rayonnement : $\approx 3 \cdot 10^{17}$ Pa, soit $\approx 3 \cdot 10^{12}$ fois la pression atmosphérique.

Fréquence des tirs laser : 1 tir par minute et 300 tirs par jour.

Superficie des installations : 3 500 m² (dont 750 m² pour le laser et deux salles expérimentales radioprotégées de 250 et 400 m²).

Budget : 50 millions d'euros (coût actuel total).

¹ Un pétawatt (PW) équivaut à 10^{15} W, soit un million de milliards de watts.

² Le record actuel pour un faisceau laser est détenu par le laser PETAL, installé sur le Centre d'études scientifiques et technique d'Aquitaine du CEA (CEA Cesta), et qui a atteint 1,2 PW en mai 2015. Le laser LFEX, installé à l'université d'Osaka (Japon), est lui parvenu à atteindre 2 PW en combinant 4 faisceaux.

³ Puissance = énergie / durée.

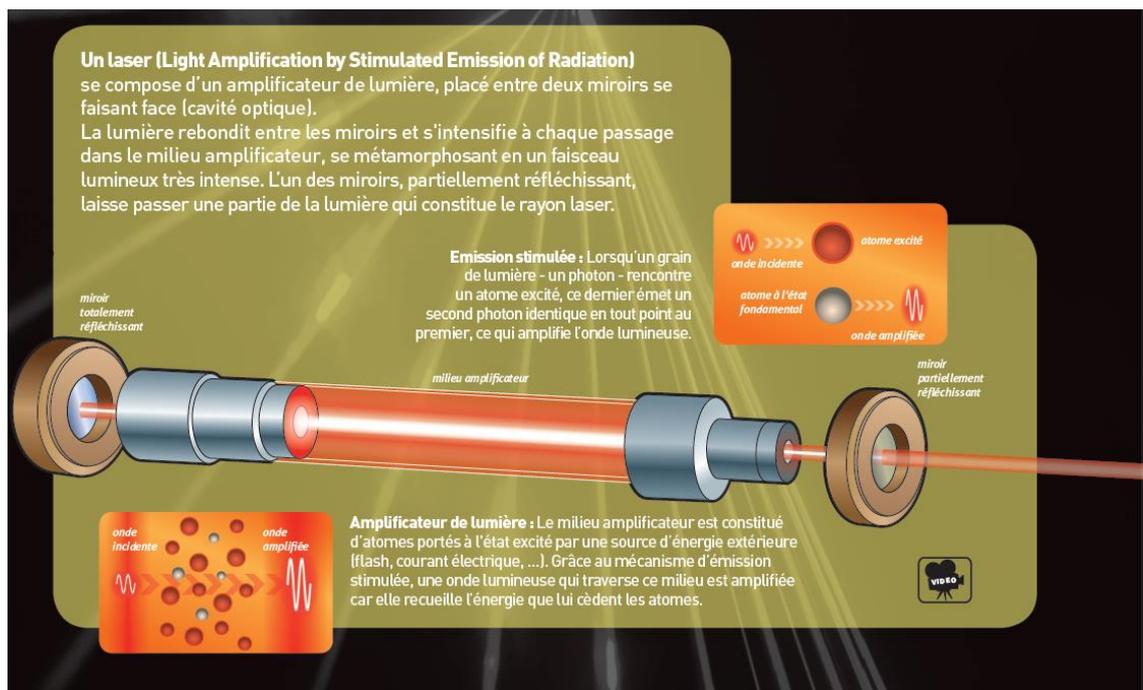
⁴ Une femtoseconde (fs) équivaut à 10^{-15} seconde soit un milliardième de milliardième de seconde.

Fonctionnement

La lumière laser

Très directionnelle, d'une couleur unique très pure, la lumière laser* est constituée de grains de lumière, les photons, tous identiques et parfaitement superposés. Le laser sert en médecine, dans l'industrie, dans les lecteurs DVD, ou dans les fibres optiques des réseaux internet...

Plus l'impulsion laser est brève, plus elle est composée de photons de couleurs différentes, autour de la couleur centrale.



Crédit : CNRS

Une source laser est en général constituée de deux miroirs disposés de part et d'autre d'un milieu amplificateur constitué d'atomes excités. Chaque photon qui arrive sur un atome excité induit l'émission par cet atome d'un deuxième photon, identique. S'en suit une multiplication du nombre de photons qui se traduit par l'amplification de l'onde lumineuse. L'un des miroirs est partiellement réfléchissant et laisse sortir une partie de la lumière qui constitue le rayon laser. Cette petite impulsion peut ensuite être amplifiée dans des amplificateurs de diamètre croissant (pour Apollon, le milieu amplificateur est constitué de cristaux de saphir dopé au titane mesurant jusqu'à 20 cm de diamètre).

* acronyme de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, que l'on peut traduire par *amplification de lumière par émission stimulée*

La chaîne laser

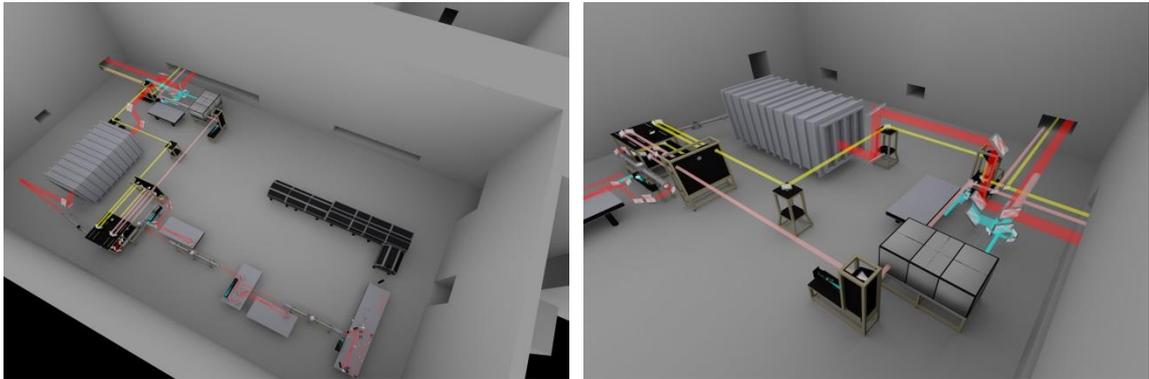
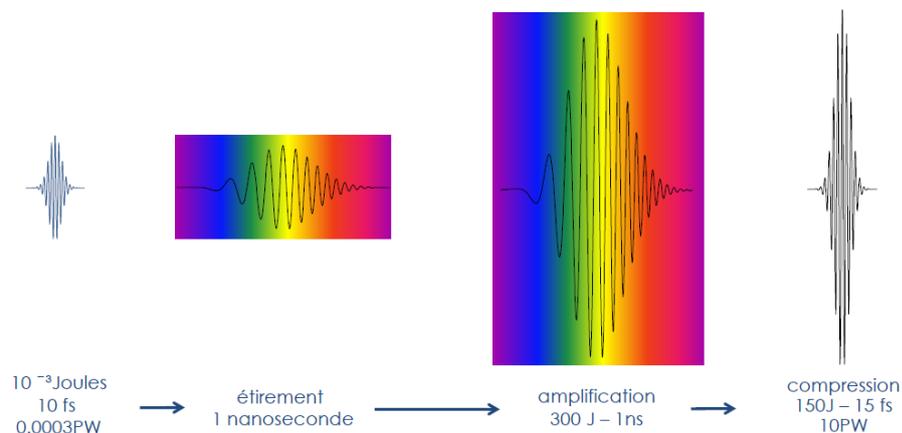


Schéma général de la chaîne laser d'Apollon comprenant : le pilote où l'impulsion est fabriquée, étirée jusqu'à 1 nanoseconde et préamplifiée (tables en noir), les étages d'amplification jusqu'à 140 mm de diamètre, la séparation en quatre faisceaux indépendants, et la compression dans des grandes enceintes sous vide (à gauche pour le faisceau principal en rouge en 400 mm de diamètre). Les quatre faisceaux sont ensuite dirigés vers les salles expérimentales (image de droite). Crédit : Dominique Fournet/LULI.

Apollon produira quatre faisceaux laser, issus d'une chaîne unique que l'on peut scinder en quatre étapes : production de la lumière laser, étirement, amplification et enfin compression.



Principe de fonctionnement de la chaîne laser d'Apollon. Crédit : François Amiranoff/LULI

Le pilote délivre une impulsion lumineuse initiale, de faible énergie, qui sera ensuite amplifiée. Les impulsions générées ont une énergie de l'ordre de 30 mJ, une durée inférieure à 10 fs et une couleur rouge profonde (longueur d'onde de 800 nm).



Le faisceau est alors étiré temporellement jusqu'à la durée d'une nanoseconde⁵. En effet, il est impossible d'amplifier directement une impulsion courte à haute énergie sans détérioration des optiques qui constituent la chaîne amplificatrice, en raison du fort éclaircissement engendré.

Il passe ensuite dans une chaîne amplificatrice qui augmente son énergie d'un facteur 1000 en augmentant son diamètre jusqu'à 140 mm, tout en conservant les autres propriétés⁶. En sortie de chaîne amplificatrice, son énergie atteindra 140 J (voire 330 J à terme, dans la configuration « 10 PW »). Il est alors séparé en quatre faisceaux d'énergies différentes, qui pourront être utilisés ensemble ou séparément.

Pour finir, certains faisceaux doivent encore être comprimés temporellement jusqu'à atteindre la durée de 15 fs, condition nécessaire pour obtenir une puissance de l'ordre du pétawatt. Pour cela, après amplification, trois des quatre faisceaux sont transportés jusqu'à des compresseurs sous vide contenant des réseaux optiques très grands et très plats, résistant à une intensité extrême. Le schéma du compresseur à réseaux permet de resynchroniser les différentes couleurs du faisceau qui a été étiré par un processus inverse en début de chaîne en leur faisant parcourir des chemins de longueurs différentes. Pour ne pas détériorer ces réseaux, le faisceau principal est agrandi jusqu'à un diamètre de 400 mm.

Caractéristiques des quatre faisceaux produits

- un faisceau laser principal (40 cm de diamètre), délivrant des impulsions de 15 fs avec une énergie maximale de 150 J soit une puissance de 10 PW (5 PW dans un premier temps), à 1 tir par minute ;
 - un faisceau laser secondaire (14 cm de diamètre), délivrant des impulsions de 15 fs avec une énergie maximale de 15 J, soit une puissance de 1 PW ;
 - un faisceau laser de « création » (14 cm de diamètre), délivrant des impulsions de 1 nanoseconde avec une énergie maximale de 250 J. Ce laser permettra de préformer un plasma⁷ (en préchauffant une cible ou en la comprimant par un choc) ;
 - un faisceau laser sonde délivrant des impulsions de 15 fs avec une énergie maximale de 250 mJ (10 TW⁸). Ce laser permettra de « photographier » la cible.
-

⁵ Une nanoseconde (ns) équivaut à 10^{-9} seconde soit un milliardième de seconde.

⁶ Cette amplification en plusieurs étapes est à nouveau une contrainte liée à la résistance des optiques utilisées.

⁷ Un plasma est un gaz ionisé.

⁸ Un térawatt (TW) équivaut à 10^{12} W, soit mille milliards de watts (mille fois moins qu'un pétawatt).



www.cnrs.fr



Les salles expérimentales

Les faisceaux peuvent ensuite être acheminés dans l'une ou l'autre des deux salles expérimentales. Chaque expérience mobilise entre un et quatre faisceaux. À l'intérieur d'une enceinte, ils sont focalisés sur une toute petite surface, afin de concentrer l'énergie délivrée à la cible. L'enceinte contient aussi tous les instruments de mesure permettant de caractériser le plasma ou les rayonnements obtenus.

Dans la salle « longue focale », la lumière laser sera focalisée par un miroir de très grande focale, c'est-à-dire qu'elle sera concentrée sur une zone très petite située à plusieurs mètres du miroir. L'objectif principal sera de produire des sources d'électrons et de les accélérer pour leur faire atteindre de très hautes énergies.

Dans la salle « courte focale », la lumière sera focalisée à plus faible distance du miroir (environ un mètre). Ainsi, elle sera concentrée sur une toute petite zone (quelques micromètres⁹ carrés) et l'interaction avec la cible se fera donc avec une intensité très élevée (10^{22} W/cm²). Cela permettra de générer des faisceaux de protons, d'ions et de rayonnements X ou gamma.

Un défi technique

Pour des lasers de cette ampleur, il a fallu repousser les limites technologiques actuelles dans plusieurs domaines, en particulier pour les optiques de grand diamètre. Parmi celles-ci, on peut citer la fabrication de cristaux de titane-saphir d'un seul tenant et de qualité optique parfaite jusqu'à au moins 20 centimètres de diamètre, de réseaux de diffraction mesurant 90 centimètres sur 45. Mais aussi de miroirs adaptés à des faisceaux de 400 millimètres de diamètre (comparés à environ 100 mm pour des faisceaux de 1 PW), d'une planéité remarquable – l'ensemble de la surface de ces grandes optiques doit être plane à moins d'une petite fraction de micromètre près – et fonctionnant sur une gamme spectrale très large (700 à 900 nm), intrinsèque aux durées d'impulsions femtosecondes. De plus, tous ces éléments doivent supporter des intensités lumineuses très élevées et résister à un grand nombre de tirs laser.

En ce qui concerne le schéma de la chaîne d'amplification laser, obtenir des impulsions ultra brèves à haute puissance nécessite de contrôler toutes les propriétés optiques du faisceau, comme sa planéité et sa largeur spectrale avec une précision remarquable. L'obtention de l'énergie finale en une seule chaîne d'amplification est en soi un autre défi qui a nécessité un grand nombre d'études préalables et la validation de nouveaux concepts.

La mesure précise des propriétés de ce type de faisceaux, qui ne peut se propager dans l'air ni traverser de matière sans que sa qualité optique soit irrémédiablement perdue, est un problème complexe qui suscite encore de nombreux travaux et conduit au développement de nouveaux instruments sophistiqués.

⁹ Un micromètre (μm) équivaut au millième du millimètre.



Réalisation

Portée par le CNRS en partenariat avec l'École polytechnique, le CEA, l'Institut d'Optique Graduate School (IOGS), l'ENSTA ParisTech et l'Université Paris-Sud, l'installation laser Apollon se situe au cœur de l'Université Paris-Saclay.

Le Laboratoire pour l'utilisation des lasers intenses (LULI, CNRS/École polytechnique/CEA/UPMC) assure depuis 2011 la coordination et la gestion du projet tout en contribuant à la partie compression et à l'ingénierie de l'ensemble du laser.

Deux autres laboratoires ont été particulièrement impliqués dans la construction du laser : le Laboratoire Charles Fabry (LCF, CNRS/IOGS) pour la partie pilote, et le Laboratoire d'optique appliquée (LOA, CNRS/ENSTA/École polytechnique) pour la partie amplification.

Plusieurs autres laboratoires ont pris part au projet, qui comprend le laser et également deux salles expérimentales, notamment le Laboratoire de physique des gaz et des plasmas (LPGP, CNRS/Université Paris-Sud), le Laboratoire Leprince-Ringuet (LLR, CNRS/École polytechnique), le Laboratoire interactions, dynamique et lasers (LIDyL, CEA).

Des industriels ont fourni certaines pièces de l'installation : on peut notamment citer les lasers de pompe (Amplitudes technologies, Thalès), l'enceinte à vide du compresseur 10 PW (ACPP), les miroirs de transport de faisceau, le dièdre du compresseur 1 PW (Safran REOSC), les paraboles de transport de faisceau et les réseaux du compresseur 10 PW (ARDOP).

Apollon est le résultat d'une expertise française de longue date dans les lasers de puissance et la technologie associée. Dans ce domaine, les laboratoires franciliens ont fait émerger de nombreuses startups reconnues dans le monde entier et un nombre important de collaborations industrielles.

Apollon au cœur de Cilex, une communauté interdisciplinaire autour de la lumière extrême

Apollon est l'installation centrale de Cilex¹⁰, une communauté fédérant l'ensemble des acteurs travaillant sur la lumière extrême (universités, grandes écoles, organismes de recherche académiques, partenaires industriels), regroupés principalement sur le plateau de Saclay. Ses membres ont participé à la conception d'Apollon et/ou en seront de futurs utilisateurs.

Cilex fédère douze laboratoires de l'Université Paris-Saclay qui couvrent l'ensemble des compétences nécessaires à la construction et l'exploitation de lasers de forte puissance. En plus d'Apollon, la communauté s'appuie notamment sur des lasers satellites que l'on appelle aussi « centrales de proximité » et qui posent les jalons des futures expériences sur Apollon.

¹⁰ Financé sous la forme d'un Equipex (équipement d'excellence) dans le cadre du programme d'investissements d'avenir (2011-2019).



www.cnrs.fr



Structures membres

- Laboratoire pour l'utilisation des lasers intenses (LULI, CNRS/EP/CEA/UPMC)
- Laboratoire Charles Fabry (LCF, CNRS/IOGS)
- Laboratoire Leprince-Ringuet (LLR, CNRS/EP)
- Laboratoire d'optique appliquée (LOA, CNRS/ENSTA/EP)
- Institut rayonnement matière de Saclay (IRAMIS, CEA)
- Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (IRFU, CEA)
- Laboratoire de l'accélérateur linéaire (LAL, CNRS/UPS)
- Fédération de recherche lumière matière (LUMAT, CNRS/UPS/IOGS)
- Laboratoire de physique des gaz et des plasmas (LPGP, CNRS/UPS)
- Centre de physique théorique (CPHT, CNRS/EP)
- Institut des sciences moléculaires d'Orsay (ISMO, CNRS/UPS)
- Soleil (société civile financée par le CNRS et le CEA)

EP : École polytechnique ; IOGS : Institut d'Optique Graduate School ; UPMC : Université Pierre et Marie Curie ; UPS : Université Paris-Sud

Centrales de proximité

- Laser Salle Jaune (au LOA, à Palaiseau)
- Laser UHI100 (au LIDyL, à Saclay)
- Laser LaseriX (au LUMAT, à Orsay)
- Laser ELFIE (au LULI, à Palaiseau)

Financements

Le projet Apollon a bénéficié d'un budget global de l'ordre de 50 millions d'euros, principalement dans le cadre du Contrat de plan État Région (CPER) 2007-2013 (État, région Île-de-France, département Essonne et CNRS) et de l'Equipex Cilex dans le cadre du programme d'investissements d'avenir (2011-2019), et par des soutiens complémentaires du CNRS et de l'École polytechnique, ainsi que du CEA, de l'ENSTA ParisTech et de l'IOGS.

Des financements européens ont été apportés via le fonds FEDER en 2014, et un nouveau CPER vient d'être signé en 2015.

En matière de ressources humaines, les personnels affectés au projet ou recrutés spécialement sont employés majoritairement par le CNRS et l'École polytechnique. Par ailleurs, des personnels du CEA ont été affectés à la rénovation des locaux qui accueillent Apollon.



Le site d'accueil : le bâtiment de l'ancien accélérateur linéaire de Saclay

Construite il y a 50 ans à l'Orme des Merisiers, à proximité du site principal du centre CEA de Saclay, cette infrastructure d'une surface totale de 17 000 m² comprend 4 800 m² de salles enterrées à 6,25 mètres sous terre. Conçu pour abriter l'Accélérateur linéaire de Saclay (exploité entre 1969 et 1990 par le CEA), ce site a été choisi pour accueillir l'installation Apollon du fait de ses caractéristiques exceptionnelles, nécessaires pour mener des expériences de haut niveau en physique de l'interaction laser-matière.

L'installation Apollon occupera près de 4 000 m², répartis en 4 grandes salles (une pour la chaîne amplificatrice, une abritant le compresseur, et deux salles expérimentales), dont 1 500 m² radioprotégés. Les locaux restants permettront d'accueillir d'autres installations lasers de Cilex ainsi que les installations Attolab¹¹ du LIDyL.

Une infrastructure aux caractéristiques exceptionnelles

Le socle du bâtiment, constitué d'une dalle de béton de près de deux mètres d'épaisseur, garantit l'absence de vibrations et assure une stabilité parfaite. Ces caractéristiques sont particulièrement utiles pour une installation laser comme Apollon, dont le faisceau laser devra parcourir des centaines de mètres sans supporter la moindre variation de pointé. Les murs en béton mesurent 4,8 m d'épaisseur, et constituent une protection efficace et polyvalente contre les rayonnements, qui permettra aux physiciens de mener des campagnes expérimentales en toute sécurité, sans risque d'exposition pour le personnel, ni préjudice à l'environnement.

Trois « portes bouchons », blocs monumentaux de 48 m³ et de 150 tonnes de béton se déplaçant sur une crémaillère, permettront de fermer les entrées des salles d'expérience d'Apollon.

Les aménagements pour accueillir Apollon

Les infrastructures existantes ont nécessité des aménagements importants pour l'installation et l'exploitation d'Apollon. En particulier, la salle qui accueillera le laser a dû être reconvertie en salle blanche (avec une qualité de l'air respectant les normes d'empoussièrement ISO8 à ISO7¹²) et régulée avec grande précision aussi bien en température qu'en hygrométrie. Ceci représente un volume d'air de près de 7 000 m³ à traiter. Une fosse de 2 000 m³, descendant à 12,6 m sous le sol, dut être condamnée pour y installer une des salles d'expérience Apollon.

¹¹ Attolab a pour objectif d'établir une plateforme expérimentale multi-site pour les études interdisciplinaires de dynamique ultra-rapide (dynamique électronique et nucléaire aux échelles de temps, respectivement, attoseconde et femtoseconde) dans les systèmes en phase gazeuse, condensée et plasma. Equipement d'excellence (Equipex) financé par le programme "Investissements d'Avenir 2011" de l'ANR, le projet associe neuf laboratoires partenaires de l'Université Paris-Saclay.

¹² Ces normes correspondent à des limites admissibles de présences de particules, en fonction de leur taille, dans un m³ d'air. Exemple : la norme ISO 8 limite la quantité de particules dont le diamètre est égal à 5 µm à environ 30 000 par m³ (3 000 pour la norme ISO 7).



www.cnrs.fr



Calendrier

- 2006 : lancement du projet.
- 2007 : début des développements laser.
- 2012 : lancement des travaux sur le site de l'ancien accélérateur linéaire de Saclay (CEA, Orme des Merisiers).
- depuis mars 2015 : assemblage du laser sur le site de l'Orme des Merisiers.
- décembre 2015 : jalon 140 J (soit validation de l'ensemble de la chaîne d'amplification laser).
- mars 2016 : compression d'une partie de l'énergie jusqu'à une puissance de 1 PW.
- septembre 2016 : salles expérimentales opérationnelles. Premières expériences au niveau 1 PW.
- octobre 2016 : compression de l'énergie laser complète au niveau multi-PW (≈ 5 PW).
- mars 2017 : premières expériences avec 2 faisceaux au niveau 5 PW + 1 PW.
- 2018 : ouverture à la communauté scientifique.



LES OBJECTIFS SCIENTIFIQUES

Défi technique en tant que tel, la construction d'Apollon stimule le domaine des lasers, tant du côté de la recherche que pour les industriels qui ont fourni certains composants. Mais au-delà de la prouesse technique et du record visé, l'installation remplira un certain nombre d'objectifs scientifiques.

Produire des sources secondaires de rayonnements et de particules

Un premier objectif concernera l'étude et le développement de sources secondaires de rayonnements (rayons X, gamma) et de particules (électrons, protons...). Un laser de puissance pointé sur une « cible » solide ou gazeuse peut en effet lui arracher des électrons ou des ions. Les faisceaux ainsi formés sont dotés d'une forte énergie et les particules y sont accélérées à des vitesses vertigineuses. En provoquant des collisions entre des faisceaux d'électrons et des faisceaux laser, on peut ensuite produire des rayons X et gamma très énergétiques. Ces sources de particules et de rayonnements servent d'outils dans un grand nombre d'expériences (voir plus bas). Par rapport à celles créées dans des accélérateurs, les sources produites avec des lasers présentent des avantages en termes de compacité, de brièveté et de maniabilité.

Les scientifiques d'Apollon espèrent en particulier accélérer des électrons à des énergies de l'ordre de la dizaine de gigaélectron-volt (GeV)¹³ et même au-delà ; mais également des faisceaux de protons et d'ions à plusieurs dizaines de mégaélectron-volt (MeV), voire à 1 GeV dans quelques années. Ils souhaitent aussi parvenir à produire des faisceaux de rayons X dans le domaine attoseconde¹⁴. Tout ceci permettra d'explorer des pans nouveaux de la physique.

Explorer de nouveaux pans de la physique

Physique relativiste

Apollon permettra d'étudier le comportement de la matière lorsque les particules se déplacent à une vitesse proche de celle de la lumière, un champ de la physique qualifié de « relativiste ». Si les électrons sont facilement accélérés à ces vitesses, cela reste un vrai défi pour les protons et les ions.

Physique attoseconde

Des impulsions laser ultra-brèves tirées sur une cible solide génèrent des faisceaux de rayons X de durée encore plus brève, de l'ordre de l'attoseconde (le record est actuellement de 65 attosecondes). Or, c'est la durée caractéristique de la rotation d'un électron autour d'un noyau d'atome. De tels faisceaux de rayons X

¹³ Le gigaélectron-volt (GeV) est une unité de mesure de l'énergie adaptée à la physique des particules. 1 GeV vaut $1,6 \times 10^{-10}$ joule. 1 MeV, mille fois moins.

¹⁴ Une attoseconde (as) vaut 10-18 seconde (un milliardième de milliardième de seconde).



permettraient donc de « radiographier » la matière non seulement à une échelle spatiale très fine, mais aussi avec une résolution temporelle inégalée.

Physique du vide

Malgré son nom, le vide est rempli en permanence de paires de particules virtuelles, qui se créent et s'annihilent en un temps record, de l'ordre de 10^{-21} s pour des paires électron-positron (antiparticule de l'électron). Le très fort champ électrique produit par Apollon pourra interagir avec ces particules virtuelles, modifiant ainsi leur propagation. Il deviendra alors possible d'étudier certaines propriétés du vide et, pourquoi pas, de séparer une partie de ces paires virtuelles avant qu'elles ne se recombinent, forçant leur transformation en particules réelles.

Simuler des phénomènes astrophysiques en laboratoire

Des tirs lasers sur une cible épaisse peuvent, par exemple, générer des faisceaux d'électrons et positrons, accompagnés de rayonnement gamma. Ces expériences et d'autres du même type pourront permettre de reproduire, à échelle réduite, certains aspects des événements les plus violents de l'Univers, comme les supernovae (explosions d'étoiles), les sursauts gamma (émissions très brèves et très intenses de faisceaux de rayons gamma par des objets astrophysiques) ou encore les jets stellaires (jets de matière émis par les étoiles en formation).

Analyser la matière à des échelles ultra-fines

Grâce à leur intensité très élevée et à leur durée très brève, les faisceaux de rayonnement ou de particules produits par Apollon permettront d'analyser la matière avec la meilleure résolution temporelle possible. Par exemple, grâce à une source de rayons X, on pourra suivre en temps réel l'évolution de structures moléculaires (les transformations qui ont lieu au cours d'une réaction chimique, par exemple). Ou encore, avec des faisceaux de protons, « radiographier » l'intérieur de plasmas très chauds, qui modélisent à échelle réduite l'intérieur des étoiles.

Des pistes à plus long terme

Les recherches menées avec Apollon pourraient déboucher sur des applications multiples pour la société – bien que l'échéance temporelle en soit plus lointaine. Avec Apollon, ce sont les principes expérimentaux qui seront validés : leur fiabilité et leur répétabilité. La technologie laser évoluant en parallèle, il sera ensuite possible d'adapter les nouvelles technologies mises au point à des instruments plus petits.



www.cnrs.fr



Nouvelles technologies d'accélération pour les accélérateurs du futur

Alors que les grands accélérateurs de particules (comme le LHC du CERN) arrivent à une limite, les recherches menées avec Apollon pourraient déboucher à terme sur de nouvelles technologies d'accélération. Le but étant d'atteindre, sur quelques mètres ou quelques dizaines de mètres, la même énergie qu'au CERN, étendu sur plusieurs kilomètres.

Des tests à « grande échelle » seront réalisés dans la salle expérimentale à longue focale. L'idée est de parvenir à une preuve de concept sur deux « étages ». Envoyer de manière reproductible vers le deuxième étage le faisceau d'électrons accélérés dans le premier étage est un vrai défi. Une fois relevé, il suffirait ensuite d'empiler les étages d'accélération pour obtenir une accélération de particules du même ordre que celle générée dans le LHC.

Applications médicales

Bien que très en amont, les études entreprises sur ces installations pourraient, à terme, déboucher sur des applications médicales comme la production de faisceaux de protons, compacts et à moindre coût, pour le traitement de tumeurs cancéreuses (protonthérapie). Par rapport aux rayons utilisés classiquement en radiothérapie (électrons, photons), les protons offrent l'avantage d'une très grande précision (épargnant les tissus sains entourant la tumeur). Mais la mise en œuvre de cette technique reste lourde et coûteuse. Par conséquent, seuls deux centres en France sont actuellement équipés, avec des accélérateurs classiques. Une technologie d'accélération par laser pourrait démocratiser la protonthérapie.

Des avancées sont aussi possibles en imagerie médicale (voir « analyser la matière... », plus haut).

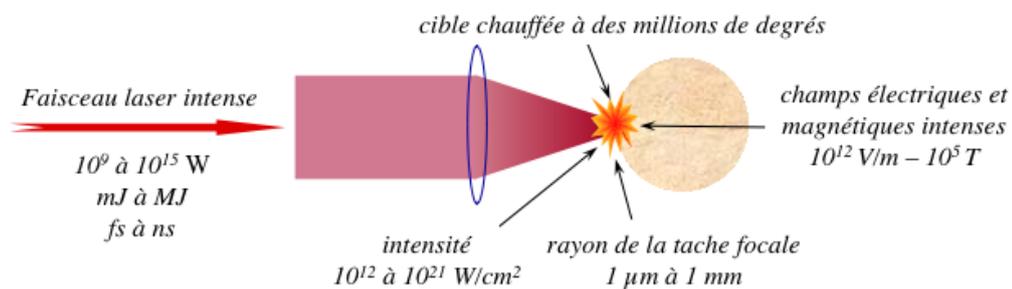
Traitement des déchets nucléaires

Un autre axe de recherche porte sur la possibilité de transformer des éléments très radioactifs et à vie longue en éléments moins radioactifs et à vie plus courte, en utilisant des faisceaux d'électrons ou de protons très énergétiques. Ces recherches très amont entrent dans le cadre d'études pour le développement de systèmes spécifiquement dédiés à la transmutation des déchets. La viabilité d'un tel concept n'est pas encore assurée, et de nombreux défis technologiques restent à surmonter.

CONTEXTE

Les lasers de puissance

Les recherches sur les plasmas créés par les lasers de puissance et leurs applications sont basées sur les qualités remarquables des lasers : leur très forte puissance et les petits diamètres sur lesquels ils peuvent être focalisés. Les milieux créés par interaction laser-matière sont caractérisés par une très forte densité d'énergie et par la présence de champs électriques et magnétiques extrêmes.



D'une puissance inégalée et focalisables sur des dimensions microscopiques, les lasers de puissance permettent de produire des milieux ionisés (plasmas) dans des conditions extrêmes, et d'aborder de nombreux thèmes innovants en science fondamentale ou appliquée, dont la production d'énergie, l'astrophysique, la géophysique, les accélérateurs de particules, les sources de rayons X et les phénomènes ultra-rapides. Crédit : François Amiranoff/LULI.

De façon schématique, ces lasers délivrent des impulsions « longues » (à l'échelle de la nanoseconde), des impulsions brèves (à l'échelle de la picoseconde¹⁵), ou des impulsions ultra-brèves (à l'échelle de la femtoseconde). Deux paramètres importants pour l'utilisation de ce type de laser sont l'énergie transportée par chaque impulsion et l'intensité¹⁶ obtenue au point de focalisation sur la cible.

Une énergie élevée permet de produire des plasmas chauds sur de grandes dimensions (de l'ordre du millimètre). Ces énergies élevées sont obtenues pour des impulsions longues, jusqu'au niveau de 1 kJ sur le laser LULI2000 (LULI, CNRS/École polytechnique/CEA/UPMC) et jusqu'au niveau du mégajoule¹⁷ pour le NIF aux États-Unis et le Laser Mégajoule (LMJ) au centre CEA Cesta, en Aquitaine. Pour ces lasers en impulsions nanoseconde, les principales recherches portent sur l'étude de la matière à haute densité d'énergie et ses applications en astrophysique et géophysique (par exemple les cœurs de planètes, certains milieux astrophysiques comparables à ce que l'on trouve dans les étoiles ou dans des jets de

¹⁵ Une picoseconde (ps) équivaut à 10^{-12} seconde soit mille fois moins qu'une nanoseconde et mille fois plus qu'une femtoseconde.

¹⁶ Intensité : puissance concentrée sur une surface donnée (exprimée par exemple en W/cm^2).

¹⁷ Un mégajoule vaut 10^6 joules (un million de joules).



matière), mais aussi en fusion thermonucléaire contrôlée (reproduire en laboratoire les mécanismes à l'œuvre dans les étoiles), avec ses volets civil (production d'énergie) et militaire (simulation d'armes nucléaires).

Il est possible, dans certaines conditions, de comprimer une partie de l'énergie obtenue en régime nanoseconde grâce à des ensembles de grands réseaux optiques. Les limitations portant sur la résistance des matériaux et les dimensions des réseaux (qui atteignent aujourd'hui un mètre) permettent de comprimer au maximum quelques kilojoules en impulsions de l'ordre de la picoseconde. Dans cette catégorie entrent le laser PETAL¹⁸, qui sera couplé au LMJ sur le centre CEA Cesta (en Aquitaine), OMEGA EP aux États-Unis et LFEX au Japon. Les impulsions picoseconde permettent d'atteindre des intensités élevées, et donc des régimes différents. Les applications principales reposent sur la génération de faisceaux intenses et brefs de particules énergétiques (électrons, protons, ions) ou de rayonnement, depuis les térahertz¹⁹ jusqu'aux rayons gamma. Ces faisceaux peuvent à leur tour être utilisés pour produire de la matière à haute densité d'énergie et pour diagnostiquer des plasmas en évolution rapide (résolution temporelle de l'ordre de la picoseconde).

En maintenant une bande spectrale suffisamment « large »²⁰ au cours de l'amplification en régime nanoseconde, il est possible d'obtenir, après compression, des impulsions en régime femtoseconde, jusqu'à quelques dizaines, voire quelques centaines de joules, soit des puissances de quelques centaines de térawatt jusqu'au pétawatt. Les impulsions femtoseconde énergétiques permettent d'atteindre des intensités encore plus élevées (aujourd'hui jusqu'à 10^{21} à 10^{22} W/cm²) et de produire des sources encore plus brèves (durée de l'ordre de la femtoseconde, voire de l'attoseconde), utilisables à leur tour pour étudier des mécanismes ultra-rapides. Apollon entre dans cette classe de lasers. Les intensités atteintes vont également donner accès à des études en physique relativiste (comportement des particules accélérées à des vitesses proches de celle de la lumière) et en physique en champ fort, dont la QED (électrodynamique quantique).

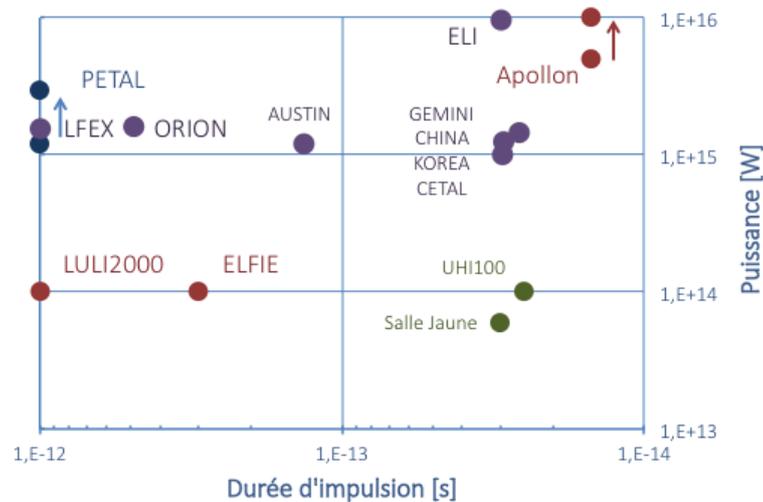
¹⁸ PETawatt Aquitaine Laser.

¹⁹ Les térahertz (THz) sont des rayonnements intermédiaires entre les micro-ondes et l'infrarouge lointain, utilisés pour détecter certains éléments comme les explosifs.

²⁰ Spectre de 700 à 900 nm pour Apollon.

Apollon parmi les installations existantes

Parmi les lasers fonctionnant en régime ps à fs, l'une des spécificités d'Apollon repose sur la durée d'impulsion plus brève et la puissance maximale plus élevée.



Panorama des installations laser de puissance, en régime picoseconde et femtoseconde, en France et à l'étranger (LFEX au Japon, ORION et GEMINI en Grande-Bretagne, AUSTIN aux USA, CETAL en Roumanie...).

En rouge, les installations gérées par le LULI.

PETAL, qui sera couplé au LMJ, atteindra les 3 PW en impulsions ps, tandis qu'Apollon atteindra les 10 PW pour des impulsions environ 30 fois plus brèves de 15 fs.

Les installations ELI au niveau de 10 PW, en construction en Roumanie, République Tchèque et Hongrie, ne seront opérationnelles que dans quelques années.

Crédit : François Amiranoff/LULI.



L'excellence française en matière de lasers

L'industrie française des lasers et de l'optique au meilleur niveau mondial

Le marché mondial pour les applications laser est de l'ordre de 4 milliards d'euros, avec une croissance supérieure à 10 % par an.

Les applications « laser » actuelles sont très diverses et leur nombre se multiplie : ophtalmologie, médical, aéronautique, spatial, défense, électronique, nucléaire, production industrielle, télécommunications, instrumentation scientifique... Dès la mise en œuvre de cette technologie dans les années 1960, la France se distingue au niveau mondial. Elle profite des recherches menées très tôt par les laboratoires de recherche publics.

Ce dynamisme se traduit notamment par des milliers d'emplois dans ce secteur. L'industrie française est particulièrement bien positionnée au niveau mondial pour les lasers de puissance en impulsions brèves. La majorité de ce chiffre d'affaire est réalisé à l'export. De grands groupes industriels (Thales, Quantel, Sagem, EADS) et des PME (Amplitude Systèmes, Syclope Electronique, I2S,...) sont impliqués dans le développement des lasers d'application scientifiques. Plus particulièrement, Thales et Amplitude Technologies représentent deux fleurons de l'industrie française de ce type de lasers et se partagent le marché mondial.

La recherche scientifique française sur les lasers reconnue à l'international

Grâce à son expertise et aux installations laser complémentaires qu'elle exploite et développe, la communauté scientifique française est reconnue dans le monde au plus haut niveau. Plusieurs acteurs industriels français s'appuient sur les compétences ainsi développées pour contribuer aux installations mondiales : une dizaine de plateformes d'expérimentation laser sont actuellement en construction, parmi lesquelles les infrastructures ELI (Extreme Light Infrastructure), en Hongrie, République Tchèque et Roumanie, financées par l'Europe pour un budget total avoisinant le milliard d'euros.

La mise en route de nouveaux équipements performants, tels que PETAL, qui sera couplé au Laser Mégajoule, ou Apollon, qui a pour ambition d'être le laser le plus puissant au monde, montre le dynamisme de la recherche française, avec deux pôles majeurs : la région Aquitaine, et le plateau de Saclay en Île-de-France. Ces équipements permettront d'explorer des domaines scientifiques encore vierges et d'étudier de nouveaux champs technologiques et applicatifs. Ceci permettra à la France de rester compétitive sur ce marché en pleine croissance.



Apollon, un jalon du projet européen *Extreme Light Infrastructure* (ELI)

Le projet Apollon a été le précurseur du projet européen ELI. Dans ce cadre, des lasers présentant des records encore inégalés qui combinent puissance, durée d'impulsion et taux de répétition sont en cours de développement en Hongrie, pour les impulsions ultra-courtes, en Roumanie, pour les applications à la physique nucléaire et en République tchèque, pour les sources secondaires de rayonnement. Ces trois projets, avec Apollon, regroupent autour d'enjeux communs une même communauté scientifique et industrielle internationale.

Le projet Apollon a levé un certain nombre de verrous technologiques et le savoir-faire développé dans les laboratoires franciliens est transféré vers les industriels, notamment dans le cadre des futures installations ELI.



LE LULI, PILOTE ET GESTIONNAIRE D'APOLLON

Le Laboratoire pour l'utilisation des lasers intenses (LULI), sous tutelle du CNRS, de l'École polytechnique, du CEA et de l'UPMC, est un centre de recherche étudiant la physique des plasmas chauds créés par laser, et leurs applications (production d'énergie par fusion inertielle, astrophysique ou planétologie en laboratoire, sources secondaires de particules et de rayonnement, traitement des matériaux sous choc...)

Le LULI est une Infrastructure de Recherche²¹ qui construit et met à disposition de la communauté scientifique – française et internationale – les installations françaises civiles les plus énergétiques en matière de laser de puissance, accompagnées d'équipements expérimentaux pour les recherches sur la physique des plasmas créés par laser (plasmas à haute densité d'énergie – HDE, et plasmas relativistes à ultra-haute intensité – UHI).

Deux installations laser dont le fonctionnement est assuré majoritairement par le CNRS structurent la communauté autour de ces deux thématiques :

- le développement et l'exploitation de l'installation laser « HDE » LULI2000, hébergé sur le site de l'École polytechnique ;
- la construction et la mise en exploitation de l'installation laser « UHI » Apollon, sur le site de l'Orme des Merisiers du CEA.

Afin de les maintenir au meilleur niveau, le laboratoire s'engage également dans des programmes novateurs sur les sources laser et les technologies associées.

Le laboratoire est très impliqué dans tous les ambitieux projets « lasers de forte énergie et plasmas » lancés ces dernières années en France et en Europe. Il a ainsi été un des partenaires du projet européen HiPER (High Power laser for Energy Research) ainsi que du projet PETAL (PETawatt Aquitaine Laser), associé au Laser Mégajoule. Il participe également au projet européen ELI (Extreme Light Infrastructure).

Le laboratoire compte une vingtaine de chercheurs physiciens, une quarantaine de personnels techniques ou administratifs et une vingtaine d'étudiants en thèse ou de jeunes chercheurs en contrat post-doctoral, auxquels s'ajoute chaque année une cinquantaine d'utilisateurs extérieurs, français, européens (par le biais de son appartenance au réseau LASERLAB-Europe) ou originaires d'autres pays (États-Unis, Japon, ...).

Profitant de son expertise internationale et de son environnement scientifique exceptionnel, le LULI joue un rôle majeur pour la formation d'étudiants en physique des lasers et en physique des plasmas chauds.

²¹ Une Infrastructure de Recherche est un laboratoire qui a la vocation d'offrir l'usage d'instruments à la pointe possédant des caractéristiques uniques, essentiels pour une grande communauté d'utilisateurs

RESSOURCES

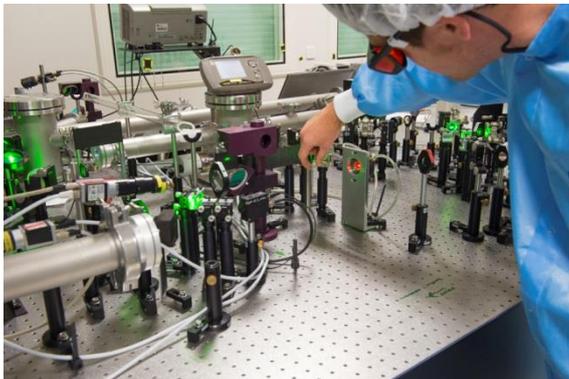
Photos



Référence : 2015N01800

Légende : vue générale du système étireur de l'impulsion, qui fait partie du pilote du laser. (On distingue, à droite un réseau coloré, et à gauche un miroir).

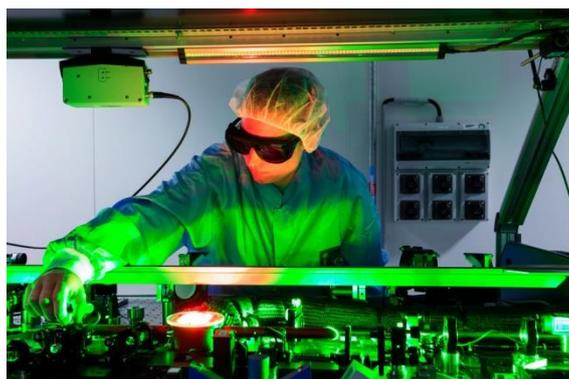
Crédit : Cyril Frésillon/LULI/CNRS Photothèque.



Référence : 2015N01791

Légende : salle laser dans laquelle l'énergie du laser est augmentée de 10 millijoules à 330 joules en passant dans 5 étages titane saphir. Chaque étage est pompé par des lasers verts (527 nm). On prend soin de ne pas dégrader les propriétés (phases) du faisceau afin de pouvoir le comprimer et obtenir au final des impulsions de l'ordre de 15 fs. En rouge : un cristal de titane-saphir, « pompé » par un laser vert.

Crédit : Cyril Frésillon/LULI/CNRS Photothèque.



Référence : 2015N01809

Légende : autre vue de la salle laser où a lieu l'amplification. En rouge, un « filtre spatial », chargé de maintenir la qualité optique du faisceau.

Crédit : Jérémie Barande/Permission to use granted by Newport Corporation. All right reserved.



Référence : ILE_A10PW_CristauxTiSA

Légende : Série des cristaux de TiSa pour l'amplification, mesurant de 15 à 175 mm de diamètre.

Crédit : Dominique Fournet/LULI/photothèque École polytechnique



Référence : 2015N01804

Légende : enceinte du compresseur à 10 PW. L'enceinte sert à assurer le vide à 10^{-6} mbar autour des optiques qui permettent de compresser l'impulsion et donc de passer de 1 ns à 15 fs. Les éléments intégrés à l'intérieur sont 4 grands réseaux optiques de $450 \times 965 \text{ mm}^2$. Chaque réseau est équipé d'une monture permettant de les régler avec une précision de l'ordre de 5 microradians.

Crédit : Jérémie Barande/LULI/École polytechnique/CNRS Photothèque.



Référence : 2015N01802

Légende : vue intérieure de l'enceinte du compresseur.

Crédit : Jérémie Barande/LULI/École polytechnique/CNRS Photothèque.



Référence : réseaux

Légende : réseaux de diffraction utilisés dans le compresseur 10 PW.

Crédit : LLNL

Photos disponibles sur demande auprès de Véronique Etienne (veronique.etienne@cnrs-dir.fr).

D'autres visuels sont disponibles à la photothèque du CNRS (<http://bit.ly/1Vij4Zw>) et à la photothèque de l'École polytechnique (contacter jeremy.barande@polytechnique.edu).



www.cnrs.fr



Liens pour en savoir plus

- Emission sur la wikiradio du CNRS : « Lumières et lasers à l'École Polytechnique »
<http://wikiradio.cnrs.fr/broadcast/864-lumieres-et-lasers-a-l-ecole-polytechnique>
- Conférence Dialogues – des clés pour comprendre : « Quand la science voit grand : Apollon, ELT, LHC... »
<http://www.arts-et-metiers.net/musee/quand-la-science-voit-grand-apollo-elt-lhc>
- En savoir plus sur Apollon, sur le site web du LULI
<http://www.luli.polytechnique.fr/accueil/les-projets/apollo/>
- Films et animations sur le laser :
 - o Laser : le principe (Tout est quantique) https://www.youtube.com/watch?v=UDxdq_ogqR8
 - o Les 50 ans du laser (CNRS Images) http://www.dailymotion.com/video/xdom9u_les-50-ans-du-laser_tech
- Dossier Journal du CNRS pour les 50 ans du laser, « La révolution laser » (pp. 18-27)
<http://www.cnrs.fr/fr/pdf/jdc/243/pdf/JDC243.pdf>
- Livret pédagogique du CEA sur les lasers
<http://portail.cea.fr/multimedia/Documents/publications/livrets-thematiques/CEA-Laser.pdf>



Apollon, un laser au zénith

UNIVERS

MATIÈRE

Physique. Une fois sa construction achevée sur le site de Paris-Saclay, Apollon sera le laser le plus puissant du monde. Les premières expériences ouvertes aux utilisateurs sont prévues pour 2018.

PAR MARTIN KOPPE

PÉTAWATT

Un pétawatt vaut 10^{15} watts, soit un million de milliards de watts.

Quand on ambitionne d'être le laser le plus puissant du monde, on peut bien porter le nom d'un dieu solaire. Apollon, dont l'assemblage final est prévu en juin, doit en effet devenir le premier laser à atteindre 5 **pétawatts**, soit cinq fois plus que les meilleurs lasers du marché. Il est même configuré pour atteindre 10 pétawatts ! Un véritable fleuron technologique, étape essentielle du projet européen Extreme Light Infrastructure, qui confirme la très bonne place de la France dans la course planétaire aux lasers géants. « Dans le cas d'Apollon, c'est l'intensité du faisceau lumineux et du champ électrique correspondant qui atteindra des records », précise Pascale

Roubin, directrice adjointe scientifique de l'Institut de physique du CNRS.

Porté par le CNRS en partenariat avec l'École polytechnique, le CEA, et l'IOGS, l'Ensta et l'université Paris-Sud, le projet est financé par la Région Île-de-France et le conseil général de l'Essonne. Il a impliqué plusieurs laboratoires du plateau de Saclay¹ depuis son lancement en 2006. Il est coordonné au sein du Luli, le Laboratoire pour l'utilisation des lasers intenses. Une collaboration loin d'être superflue pour doter Apollon de ses caractéristiques record, celles-ci réclamant des efforts importants sur les trois éléments clés des lasers : le faisceau primaire ou faisceau pilote, l'amplification de ce faisceau

1. Laboratoire Charles-Fabry (CNRS/Institut d'optique Graduate School), Laboratoire d'optique appliquée (CNRS/Ensta ParisTech/École polytechnique), Laboratoire pour l'utilisation des lasers intenses (CNRS/CEA/École polytechnique/UPMC), Laboratoire Leprince-Ringuet (CNRS/École polytechnique).

2. Site de l'ancien accélérateur linéaire de Saclay du CEA.

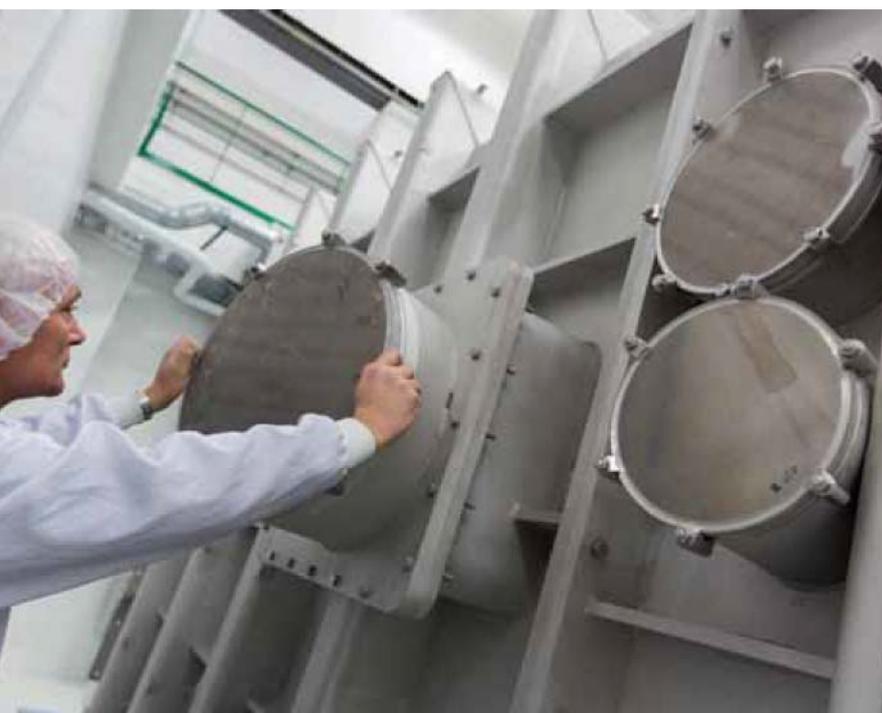
► Jean-Michel Boudenne, responsable du bureau d'études du Luli, au milieu de l'enceinte de compression.



© D. FOURNET/LULI

▼ Ces cristaux de saphir dopé au titane (TiSa) utilisés pour l'amplification mesurent entre 15 et 175 mm de diamètre.

▲ L'une des sorties du faisceau compressé.



© J. BARANDÉCOLE/POLYTECHNIQUE

et sa compression. Une gageure car, pour des lasers de cette taille, il est particulièrement ardu de contrôler tous les éléments optiques qui permettent de produire et de transporter les faisceaux de photons, de maîtriser leur qualité sur de grandes surfaces ainsi que la croissance de très grands cristaux.

À la poursuite du vide

Pas moins de 4 000 m² ont été réservés à Apollon sur le site de l'Orme des Merisiers². À elle seule, la salle laser mesure 750 m², auxquels il faut ajouter deux salles radio-protégées de 250 et de 400 m². Les chercheurs espèrent atteindre une énergie de 140 joules à la fin de l'année. Les premières manipulations devraient avoir lieu en 2017, après le passage en régime **femtoseconde**, suivies

d'une montée en puissance et des expériences ouvertes aux utilisateurs en 2018.

Mais quel est l'intérêt de produire un tel laser ? Pour François Amiranoff, ancien directeur de Luli et actuel responsable du projet Apollon, il s'agit d'explorer de nouveaux pans de la physique. Parmi ceux-ci, la physique relativiste, c'est-à-dire le fonctionnement de la matière lorsque les particules se déplacent à une vitesse proche de celle de la lumière. « Apollon nous permettra d'obtenir des sources d'électrons et d'ions de très forte énergie, s'enthousiasme-t-il. Alors que le record actuel pour des ions est de l'ordre de la centaine de mégaélectronvolts, on pourrait atteindre plusieurs gigaélectronvolts. Nous restons dans le domaine de la science fondamentale et, même si

les applications pour la société ne sont pas pour tout de suite, les possibilités sont nombreuses. »

Ces sources de rayonnements et de particules permettront en effet d'étudier et de simuler différents mécanismes liés à des événements cosmiques violents : supernovæ, pulsars, sursauts de rayons gamma... La brièveté des impulsions donne également la possibilité d'observer des phénomènes de l'ordre de la femto ou de l'**attoseconde**, durée caractéristique de la rotation d'un électron autour d'un noyau. Mais le laser Apollon ouvre également des possibilités dans le domaine des propriétés physiques du vide.

« Le vide n'est pas vide, poursuit François Amiranoff. Il y a en permanence des particules dites virtuelles qui se créent et qui s'annihilent, en particulier des paires électrons-positrons. Elles se recombinent en un temps extrêmement bref, mais un champ électrique suffisamment fort pourrait les séparer avant qu'elles ne se recombinent et forcer leur transformation en particules réelles. Il faut pour cela un laser puissant que l'on puisse focaliser sur de toutes petites dimensions. »

FEMTOSECONDE

Une femtoseconde vaut 10⁻¹⁵ secondes, soit un milliardième de milliardième de seconde.

ATTOSECONDE

Une attoseconde vaut 10⁻¹⁸ secondes, soit un milliardième de milliardième de seconde.

Des applications variées

Les chercheurs s'interrogent aussi sur la capacité d'un laser aussi puissant à traiter les déchets nucléaires. Les lasers peuvent aider à produire des réactions nucléaires et ainsi raccourcir la durée pendant laquelle les déchets restent radioactifs. Il faut cependant que l'énergie nécessaire ne soit pas excessive. Ces faisceaux sont également envisagés pour l'imagerie médicale ou le traitement des tumeurs. Toutes ces applications passent par un important travail en amont et par le développement de nouveaux lasers plus économes et à plus haute cadence. Et Apollon constitue une étape importante sur cette voie. Rendez-vous en 2018 pour les premières expériences. ||