



LASER

Le Laser Mégajoule, qui sera l'un des deux plus gros lasers au monde avec le « National Ignition Facility » américain, est en construction au centre du Cesta, près de Bordeaux. Destiné aujourd'hui au programme de dissuasion nucléaire, il pourra, à terme, s'avérer indispensable pour la médecine, l'énergie ou l'astrophysique.

TEXTE : Vahé Ter Minassian

LMJ, UN MÉGA OUTIL DE RECHERCHE

Ce sera l'un des deux plus gros lasers du monde. L'une des deux seules machines du genre, capable d'obtenir un gain d'énergie à partir d'une réaction se déclenchant au cœur du Soleil et dans les explosions thermonucléaires : la **fusion** de l'hydrogène. Actuellement en construction à proximité du centre CEA du Cesta de la Direction des applications militaires (DAM), près de Bordeaux, le LMJ (Laser Mégajoule) est avant tout un instrument destiné à la dissuasion nucléaire. Mais lorsqu'il sera opérationnel en 2014, ce gigantesque dispositif – dimensionné pour accueillir 240 faisceaux lasers pouvant délivrer durant 10 à 20 **nanosecondes**, une énergie globale de 1,8 **mégajoule** – sera également utilisé pour la recherche civile. Environ 20 % des tirs qui seront effectués à l'aide de ce laser supergéant permettront de réaliser des expériences de sciences appliquées et fondamentales. Avec un objectif : faire émerger de nouvelles disciplines dans les domaines de l'énergie, de l'astrophysique, voire de la médecine. Tout comme son alter ego américain, le NIF (*National Ignition Facility*) installé au Laboratoire Lawrence Livermore, en Californie, le LMJ est une composante du

programme Simulation français : la plupart des expériences qui y seront conduites serviront à valider des simulations numériques décrivant le fonctionnement des armes thermonucléaires, lesquelles n'étant plus testées depuis la décision française de 1995 d'arrêter définitivement les essais nucléaires. L'objectif du LMJ est de reproduire, à toute petite échelle, les phénomènes mis en jeu lors de l'explosion d'une bombe à hydrogène. Pour y parvenir, les faisceaux lasers du LMJ pénétreront par deux trous dans une cavité cylindrique de quelques millimètres cubes dont ils frapperont les parois internes. Sous l'effet de cette irradiation intense, celles-ci généreront des rayons X qui induiront des


Dès 2014, ce gigantesque dispositif à vocation militaire sera également utilisé pour la recherche civile.

>>>

Fusion // Phénomène qui permet, en l'état, de fusionner en un noyau d'hélium deux isotopes de l'hydrogène, le deutérium et le tritium.

Nanoseconde // Unité de mesure du temps correspondant à un milliardième de seconde (nano = 10⁹)

Mégajoule // Unité de mesure de l'énergie ou de la chaleur. Un million (méga) de joules correspond à la chaleur nécessaire pour amener à ébullition trois litres d'eau.



▼ Prototype de la cible, microbille formée d'une coquille de plastique de 200 microns remplie de deutérium et de tritium, qui sera fixée dans une cavité en or par des soies d'araignées.

Le LMJ en chiffres

300 m

Longueur du bâtiment qui abritera le LMJ : ses 30 chaînes lasers (240 faisceaux), son hall et sa chambre d'expérience.

125 m

Longueur des 30 chaînes lasers, nécessaire à leur amplification, *via* 4 320 plaques de verre, jusqu'à la chambre d'expérience.

10 m

Diamètre de la chambre d'expérience, percée de 112 ouvertures pour positionner les 52 instruments de diagnostic et laisser passer jusqu'à 240 faisceaux lasers, groupés par 4.

2,4 mm

Diamètre de la bille contenant le mélange deutérium-tritium vers laquelle les faisceaux convergeront pour le faire fusionner.

50 microns

Précision avec laquelle les faisceaux devront être focalisés pour pouvoir pénétrer par les extrémités de la microcavité contenant la cible.

>>> phénomènes permettant de comprimer très fortement une petite bille, placée au centre de la cavité, remplie de deutérium et de tritium (des isotopes d'hydrogène). Les physiciens vont par ce moyen créer un **plasma** si dense et si chaud – il sera porté à une température de 100 à 200 millions de degrés et à une pression de l'ordre de 1 000 milliards de fois celle de l'atmosphère – qu'il pousserait les atomes d'hydrogène à fusionner. Cette fusion produira alors, au cours d'une phase appelée « ignition », dix fois plus d'énergie que celle utilisée au départ pour allumer la réaction.

Un prototype technologique

« Mais cette expérience reste particulière parmi toutes celles qu'il est possible de réaliser à l'aide d'un instrument comme le LMJ, explique Jacques Ebrardt, chef de projet Expériences laser à la DAM. C'est pourquoi, dès le lancement du projet, il a été décidé d'ouvrir l'installation à des chercheurs français et étrangers de disciplines les plus diverses. » Ces derniers peuvent ainsi se former à l'utilisation des lasers de hautes énergies sur les équipements de la LIL (Ligne Intégration Laser) qui est le « prototype » technologique du LMJ (comprenant quatre faisceaux à l'échelle un de ceux du LMJ). Mise en service en 2002, la LIL a permis de

Comme pour le réacteur Iter, il s'agit de produire, à terme, de l'électricité à partir de la fusion.

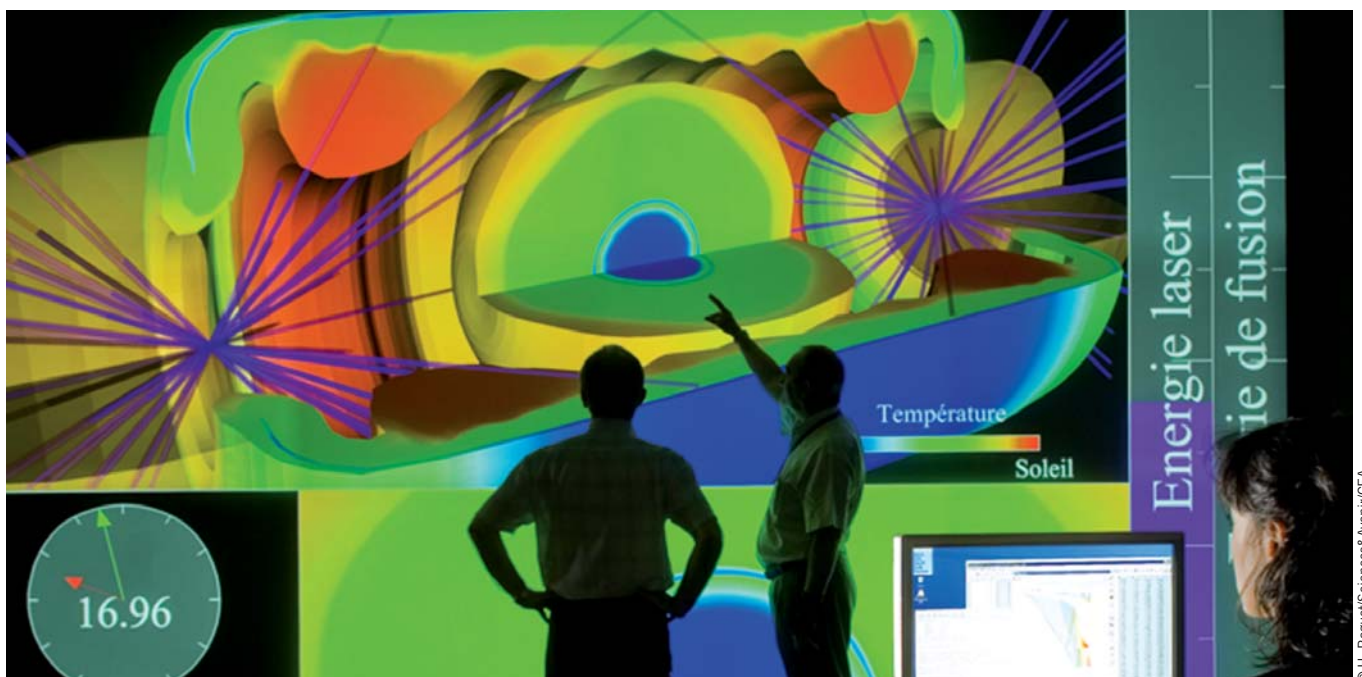
Plasma // État de la matière (solide, liquide ou gazeux), totalement ou partiellement ionisé.

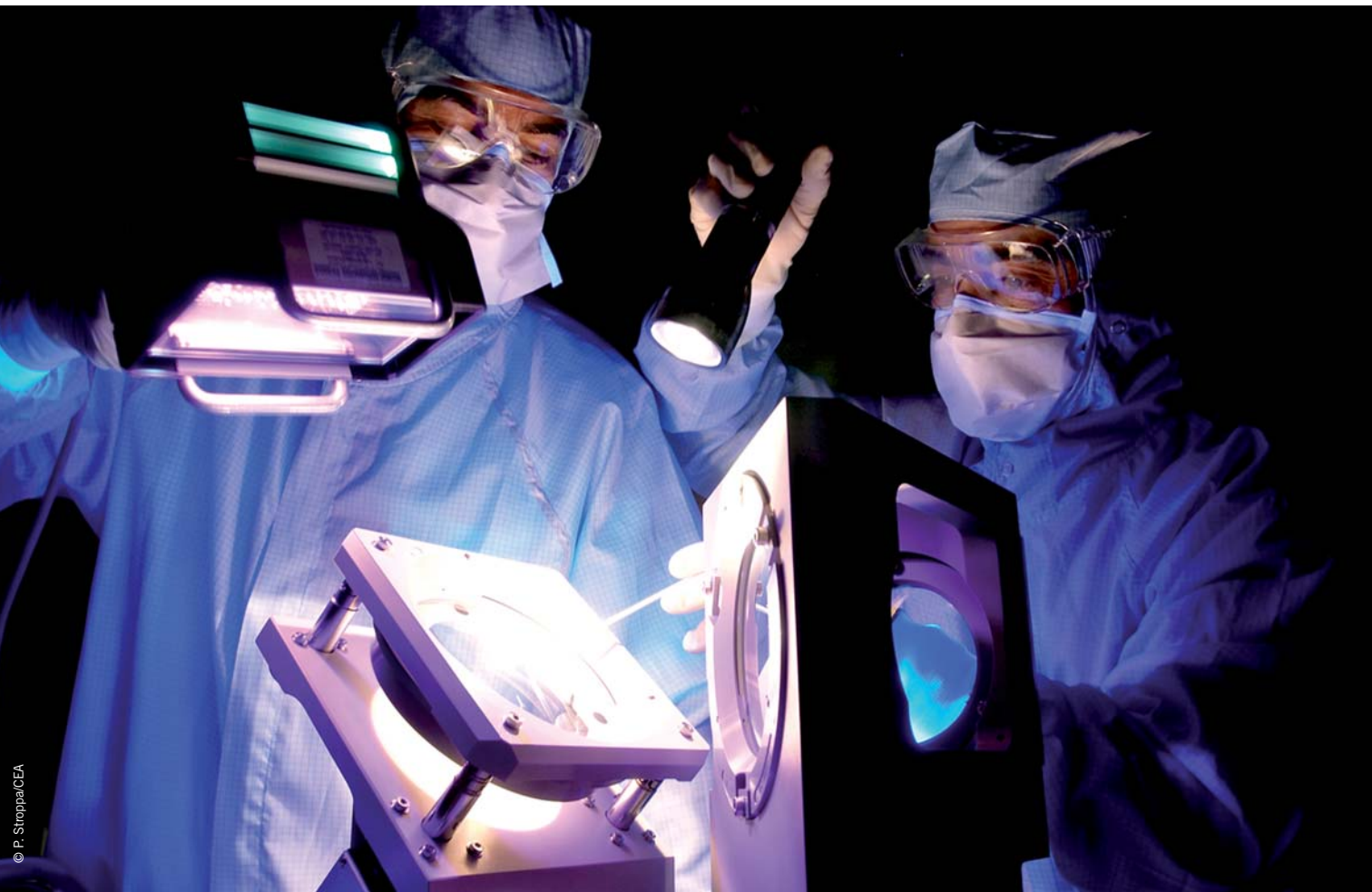
Mur d'images sur lequel est étudiée la simulation de la convergence des faisceaux lasers du LMJ (traits bleus) sur la cible (bille bleue) placée au centre d'une microcavité (enceinte verte).

Contrôles d'optiques dans les salles blanches de la Ligne d'intégration laser (LIL), prototype du laser mégajoule (LMJ).

qualifier les chaînes laser du LMJ et elle est depuis 2004 utilisée pour des expériences de physique. Plusieurs équipes, réunies dans le programme européen « HIPER » (*High power energy research*), travaillent notamment sur la « fusion nucléaire par confinement inertiel à allumage rapide ». Là, tout comme pour le réacteur expérimental « Iter », il s'agit de produire de l'électricité à partir de la fusion. Mais alors que l'instrument international en construction à Cadarache (Bouches-du-Rhône) cherche à y parvenir en confinant des plasmas avec des champs magnétiques, le procédé qui s'appuiera sur le LMJ vise à réaliser cette opération à l'aide de lasers. Toutefois, comme le précise Jacques Ebrardt, « les phénomènes physiques mis en jeu par le LMJ dans la méthode de l'ignition par allumage rapide sont différents de ceux du programme Simulation ». Pour la voie de production d'énergie, on partira d'une énergie LMJ, inférieure à celle mise en jeu pour les applications de défense, pour comprimer le même mélange deutérium-tritium pendant quelques nanosecondes et c'est l'impulsion supplémentaire d'un laser picoseconde qui viendra déclencher l'allumage et donc les réactions de fusion. Afin de générer ce flash lumineux ultracourt, les scientifiques disposeront sur place d'un laser high-tech supplémentaire : Petal (Pétawatt Aquitaine Laser), installation capable

Fusion nucléaire par confinement inertiel à allumage rapide // Méthode utilisée pour porter un combustible (ici le deutérium et le tritium) aux conditions de température et de pression nécessaires à la fusion nucléaire.





« Les lasers du LMJ sont en mesure d'exercer des pressions comparables à celles qui règnent à l'intérieur des planètes. »

Jean-Pierre Chièze, astrophysicien du CEA à Saclay

de générer des impulsions lumineuses de 3 **kilojoules** et de quelques **picosecondes** à peine. « Les équipes d'HIPER seront ainsi en mesure de tester, sur différents types de cible, les principes de base de la "fusion nucléaire par confinement inertiel à allumage rapide" ». Ce qui leur sera très utile : même si la production d'électricité par ce moyen n'était réalisable qu'après la construction d'un autre réacteur expérimental encore à l'état de projet, la théorie pourrait être validée avec le LMJ.

Autre secteur qui pourrait profiter du démarrage du laser mégajoule : l'astrophysique expérimentale. Ne bénéficiant des lasers de haute énergie que depuis quelques années, cette discipline vise à reproduire en laboratoire, pour les étudier, certains phénomènes physiques présents dans les environnements parmi les plus hostiles de l'univers. « En raison de leurs capacités à concentrer rapidement une énergie élevée dans un petit volume de matière, les lasers du LMJ sont en mesure d'exercer des pressions comparables à celles qui règnent à l'intérieur des planètes, offrant ainsi la possibilité de les étudier dans ces conditions extrêmes », explique Jean-Pierre Chièze, astrophysicien du CEA à Saclay. Les chercheurs peuvent également créer des plasmas denses et chauds, semblables à ceux présents au cœur de la plupart des étoiles. En relevant leurs propriétés optiques, ils devraient pouvoir contrôler expérimentalement les résultats des calculs très complexes de physique atomique utilisés pour modéliser le transport de l'énergie du rayonnement dans les étoiles. Les lasers de haute énergie sont en effet les >>>

Kilojoule // Unité de mesure de l'énergie ou de la chaleur. Mille joules correspondent à l'énergie déployée par un enfant de 30 kg pour monter un étage de 3 mètres.

Picoseconde // 1 billionième de seconde (pico = 10^{-12}).

>>> seuls à pouvoir – sur Terre - accélérer et faire interagir des plasmas à plusieurs centaines de kilomètres par seconde pour ainsi simuler de nombreux phénomènes se déroulant dans l'Univers, comme ceux liés aux explosions de supernovae.

Le LMJ pourrait également être utilisé pour la recherche médicale. Les lasers intenses ont, en effet, la propriété d'arracher les électrons des atomes du gaz qu'ils traversent. Quand ils en sortent, ils entraînent à leur suite des ions positifs, parmi lesquels un grand nombre de protons. Comme ces particules peuvent être utilisées par la protonthérapie pour traiter efficacement certaines tumeurs cancéreuses, les médecins souhaiteraient mettre au point des dispositifs de production de protons basés sur ce principe. Un avantage par rapport aux techniques existantes, lesquelles font appel à d'énormes installations appelées « cyclotrons » : une taille et un coût

limités qui permettraient à n'importe quel CHU ou hôpital de province d'être équipé. Des physiciens de la Direction des applications militaires travaillent déjà, avec ceux du CEA-Iramis¹, à investiguer cette perspective, notamment sur des lasers **femtosecondes**. Certaines études en amont pourront être réalisées sur Petal et le LMJ, en bénéficiant d'énergies plus élevées.

Le Laser Mégajoule devrait s'avérer un formidable outil pour l'énergie, l'astrophysique et le médical...

Si le Laser Mégajoule est une installation dédiée à la Défense, il devrait s'avérer un formidable outil pour l'énergie, l'astrophysique et le médical...

note: 1. Voir p.3, rubrique « Les laboratoires contributeurs »

Femtoseconde // Unité de mesure du temps équivalente à 1 billionième de seconde (femto = 10⁻¹⁵).

interview

Francis Hardouin est directeur adjoint de l'Institut lasers et plasmas en charge des programmes civils du Laser Mégajoule.

« Le laser le plus énergétique du monde »



© CEA

LES DÉFIS DU CEA Qu'apportera le Laser Mégajoule à la communauté scientifique ?

F. H. | Le Laser Mégajoule (LMJ) a été conçu pour les besoins de la Défense. Mais, dès 2002, il fut annoncé qu'une partie de ses activités et de celles de la LIL (Ligne Intégration Laser), son « prototype » à échelle réduite, serait tournée vers la recherche civile. Actuellement, c'est l'Institut lasers et plasmas¹ qui est chargé d'examiner, à travers des comités scientifiques, les demandes des équipes françaises ou étrangères désireuses de réaliser des expériences sur ces équipements installés sur le centre CEA du Cesta. Celui-ci met à la dispo-

sition des chercheurs des instruments d'un autre type que ceux auxquels ils sont habitués. À l'heure actuelle, la communauté scientifique s'intéresse beaucoup, par exemple, aux lasers dits « ultrarapides », c'est-à-dire à des dispositifs optiques capables de délivrer des impulsions lumineuses de l'ordre de la femtoseconde et même bientôt de l'attoseconde. Au LMJ et à la LIL, où les expériences ont démarré depuis 2005, elle aura accès à des lasers moins rapides mais susceptibles de déposer beaucoup plus d'énergie sur un échantillon. Ce qui permettra d'explorer un domaine des interactions laser/matière quasiment inconnu. Et pour cause : le

LMJ, qui devrait être opérationnel en 2014, sera avec son équivalent américain, le NIF (*National Ignition Facility*), le laser le plus énergétique du monde!

LES DÉFIS DU CEA Le Laser Mégajoule sera-t-il associé à d'autres instruments ?

F. H. | Il faut savoir que la recherche s'oriente de plus en plus vers l'utilisation conjointe des lasers très énergétiques et des lasers très rapides. C'est ainsi qu'il a été décidé de coupler le LMJ avec un laser 100 % civil : « Petal », un instrument « ultrarapide », financé par la région Aquitaine, l'Europe et le ministère de la Recherche dont les durées d'impulsion pourront être aussi courtes que 500 femtosecondes. Entre Petal, le LMJ et la LIL – dont les activités civiles pourraient excéder 20 % à partir de 2014 – les scientifiques disposeront des meilleures conditions pour réaliser leurs expériences. Cela est d'autant plus important que l'on peut chiffrer à quelques milliers en Europe, le nombre de chercheurs susceptibles d'être intéressés par ces équipements.

note: 1. L'Institut lasers et plasmas est une structure qui regroupe 25 laboratoires du CNRS, de l'université de Bordeaux 1, de l'École polytechnique et du CEA.