Les plus gros lasers du monde

Le Mégajoule, en construction près de Bordeaux, et le NIF, son concurrent américain, sont destinés à l'étude des armes nucléaires. Relanceront-ils aussi les recherches sur la fusion pour produire de l'électricité?

Cécile Michaut est journaliste.

même instant. Ils passent à travers une chaîne amplificatrice constituée de verres spéciaux, chargée de multiguidés, par un jeu de miroirs, jusqu'à la chambre d'expériences où ils viennent irradier une cible de quelques millimètres cubes. Sous le choc, un plasma extrêmement dense et chaud se forme, recréant les conditions qui règnent au centre du Soleil ou lors d'une explosion nucléaire.

Voilà ce qu'espèrent observer les physiciens dans le plus puissant laser actuellement en service : le National Ignition Facility (NIF), installé au laboratoire américain Lawrence Livermore, en Californie. Depuis son inauguration le 29 mai 2009, il est progressivement monté en énergie, pour atteindre 1,2 mégajoule fin 2009. Il ne devrait atteindre son énergie maximale que courant 2010, mais les premières expériences ont déjà débuté.

La plupart d'entre elles auront pour objectif la validation expérimentale de simulations numériques décrivant le fonctionnement des armes thermonucléaires. C'est en effet la méthode

L'essentiel

> LE PLUS GROS LASER DU MONDE, formé de 192 faisceaux qui peuvent, tous ensemble, délivrer une énergie de 1,8 mégajoule en une vingtaine de nanosecondes, est entré en service fin mai 2009 aux États-Unis.

> UNE SECONDE INSTALLATION du même type est en construction en France.

> OUTRE LA VALIDATION DES SIMULATIONS **NUMÉRIQUES DES ARMES ATOMIQUES, ces** lasers devraient permettre d'étudier la fusion civile pour produire de l'énergie ainsi que des problèmes d'astrophysique.

es 192 faisceaux laser jaillissent au retenue pour maintenir en état les armes existantes depuis que les États-Unis ont décidé de ne plus effectuer d'essais réels (ils n'ont pas ratifié le traité d'interdiction complète des essais plier par 20 000 leur énergie, puis sont nucléaires, mais ils l'ont tout de même signé en 1996). Mais le NIF servira aussi à mener des expériences civiles, appliquées, sur la fusion nucléaire, ou fondamentales, en astrophysique (lire « Comprendre l'intérieur des planètes grâce aux lasers », p. 69).

> Concurrents. Le seul concurrent du NIF est, ou plutôt sera, français: il s'agit du Laser mégajoule (LMJ) actuellement en construction près de Bordeaux. Énergie similaire (1,8 mégajoule), même longueur d'onde (350 nanomètres, de la lumière ultraviolette), même durée d'impulsion, de 10 à 20 nanosecondes. Et mêmes objectifs. Mais le LMJ, dont l'achèvement était prévu pour 2010, ne sera pas en service avant 2014, au mieux.

> Ces deux instruments ont été construits avant tout pour les recherches militaires. Il s'agit de reproduire à échelle réduite les phénomènes en jeu lors de l'explosion d'une bombe à hydrogène, par la compression d'une petite bille contenant du deutérium et du tritium. Environ 20 % des tirs du LMJ et 55 % de ceux du NIF devraient toutefois être consacrés à des expériences civiles, choisies sur appel à projets. « Des comités scientifiques composés de chercheurs français et étrangers examinent les dossiers de candidature des équipes postulantes, en se fondant sur la qualité scientifique et la faisabilité technique », explique Patrick Mora, directeur de l'Institut lasers et plasmas, installé tout près du LMJ, qui gère l'accès des communautés scientifiques aux installations laser françaises de haute énergie. Le même type d'organisation existe pour le NIF.

> Ces recherches civiles concernent en particulier la fusion nucléaire par confinement inertiel. La fusion de deux noyaux légers, par exemple du deutérium et du tritium, permet de récupérer une grande quantité d'énergie. Mais ces noyaux,

chargés positivement, tendent à se repousser, et il faut vaincre cette répulsion. Pour cela, deux possibilités: soit confiner les noyaux à l'aide d'un fort champ magnétique, comme cela sera testé dans le futur réacteur expérimental de fusion Iter à Cadarache, dans les Bouches-du-Rhône; soit les confiner à l'aide des puissants lasers du NIF ou du LMJ.

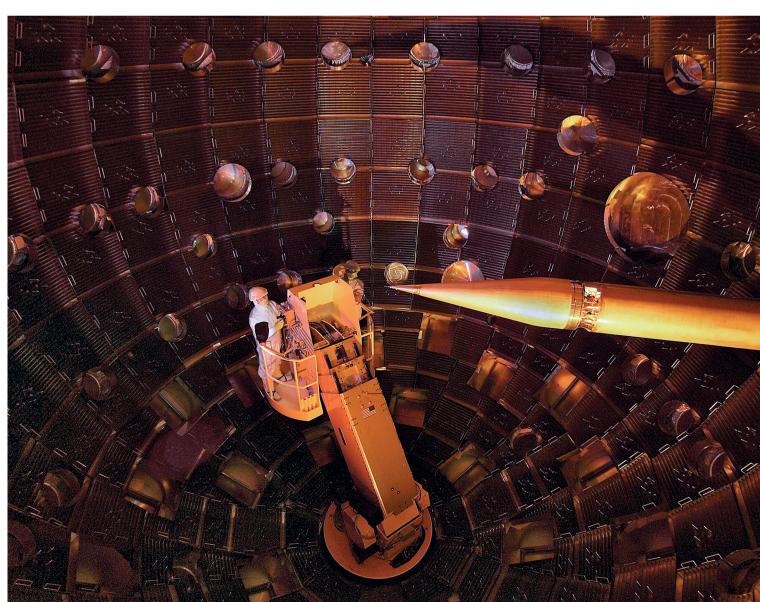
Lors des premières expériences de ce type, menées dans les années 1960 avec des lasers bien moins puissants, les physiciens avaient d'abord focalisé directement des faisceaux laser sur une cible sphérique contenant du deutérium et du tritium. Mais ils s'étaient rapidement aperçus que cette méthode directe n'était pas la plus efficace et ils avaient mis au point une méthode indirecte: les rayons laser pénètrent aux deux extrémités d'un cylindre, généralement composé de matériaux lourds tels que l'or, dont ils irradient la paroi interne. Portée à très haute température, celle-ci émet alors un puissant rayonnement X. Ce sont ces rayons X qui irradient à leur tour la cible, située au centre du cylindre, et la font

imploser. Cette attaque indirecte permet une répartition plus homogène de l'énergie déposée

Précompression. Des méthodes complémentaires sont toutefois étudiées. Ainsi, au sein de l'Institut lasers et plasmas, un groupe dirigé par Sophie Baton travaille sur un schéma alternatif dissociant les phases de compression et d'allumage de la cible, qui nécessiterait moins d'énergie: la cible serait d'abord précomprimée par une attaque directe de quelques nanosecondes, puis une impulsion laser ultracourte, de quelques picosecondes, déclencherait les réactions de fusion via des particules énergétiques.

L'objectif de ces recherches sur la fusion par confinement inertiel n'est pas seulement de fusionner un noyau de deutérium avec un noyau de tritium : cela a déjà été réalisé de nombreuses fois depuis les années 1960, essentiellement aux États-Unis, au Japon et en France. Le but est de récupérer davantage d'énergie, libérée par la fusion, que l'on en injecte pour déclencher la >>>

À l'intérieur de la chambre d'expériences du NIF, sphère métallique de 10 mètres de diamètre, le système de positionnement de la cible (à droite) est aiusté au micromètre près.



Fusion La lumière quantique

La chambre d'expériences du Laser mégajoule, quasi identique à celle du NIF, a été mise en place en novembre 2006. avant que le bâtiment lui-même ne soit terminé.



>>> réaction nucléaire : c'est l'« ignition ». Pour cela, les simulations indiquent qu'il faudrait délivrer 1,4 million de joules sur la cible. Les concepteurs du NIF et du LMJ ont préféré prendre une marge de sécurité: leurs machines pourront, à pleine puissance, délivrer 1,8 million de joules.

L'objectif est de porter les constituants de la cible à plusieurs centaines de millions de degrés et près de 40 milliards de fois la pression atmosphérique. Pour parvenir à de telles pressions et températures, il faut que les lasers transmettent efficacement leur énergie lumineuse à la matière,



Ce hall laser du NIF contient les chaînes d'amplification optique de la moitié des 192 faisceaux. Plus de 3 000 plaques de verre spécial au phosphate et au néodyme sont utilisées pour cette amplification.

et de la façon la plus homogène possible. C'est la principale difficulté à laquelle sont confrontés les expérimentateurs. L'efficacité de ce transfert d'énergie dépend essentiellement de la forme et de la nature de la cible. « Nous avons testé plusieurs formes pour la cible, et plusieurs revêtements différents, raconte Erik Storm, du laboratoire Lawrence Livermore. Nous avons mesuré la manière dont ces cibles explosaient, afin de comprendre leur comportement à ces températures, et comment l'énergie varie au cours des quelques nanosecondes que dure l'expérience. »

Outre la structure et la forme de la cible, les physiciens peuvent jouer sur la durée de l'impulsion laser et la variation d'énergie au cours de cette impulsion, voire sur la longueur d'onde du rayonnement : le plus souvent, c'est le rayonnement ultraviolet qui est utilisé, car il offre la meilleure interaction entre la lumière et la matière. Mais la lumière est amplifiée dans le domaine infrarouge et elle est convertie en rayonnement ultraviolet seulement à l'entrée de la chambre d'expérience, grâce à des cristaux « non linéaires » qui modifient leur longueur d'onde.

Cadences insuffisantes. Les physiciens du NIF espèrent atteindre l'ignition d'ici à deux ans. « Mais même si le NIF ou le LMJ parviennent à l'ignition, cela ne voudra pas dire que la fusion par confinement inertiel est à portée de main, rappelle Michel Koenig, du laboratoire pour l'utilisation des lasers intenses (LULI) à l'École polytechnique de Palaiseau. Ces installations ne peuvent effectuer que trois ou quatre tirs par jour, notamment parce qu'il faut fortement

Comprendre l'intérieur des planètes grâce aux lasers

La Ligne d'intégration

laser a servi à valider

les choix techniques

du Mégaioule

Paul Loubeyre, du Commissariat à l'énergie atomique, est spécialiste des très hautes pressions, comme celles qui règnent au sein des grosses planètes gazeuses du type de Jupiter. « Avec les méthodes les plus avancées de compression entre deux pointes de diamant, on est parvenu à comprimer l'hydrogène à plus de 3 millions de fois la pression atmosphérique, indique-t-il. En utilisant la grande énergie des lasers intenses pour créer une onde de choc dans une cible froide, on pourrait obtenir des pressions bien plus élevées. » Toutefois, une compression directe

produirait aussi un fort échauffement. Or, l'intérieur des planètes est très dense, autour de 40 millions de fois la pression atmosphérique, mais « tiède »: 10 000 à 15 000 °C seulement. « Notre idée est donc d'envoyer les faisceaux laser sur une cible déjà comprimée par une enclume à pointes de diamant et refroidie », précise le physicien. L'une des difficultés est donc la fabrication de ces enclumes qui compriment la cible, mais qui permettent aussi au laser de pénétrer jusqu'à cette dernière. Il faut donc que l'enclume comporte des fenêtres capables de supporter des pressions

de 100 000 atmosphères, mais assez mince pour que le laser les traverse. Avec de telles cibles, les physiciens prévoient d'atteindre des pressions de 10 millions de fois la pression atmosphérique, tout en maintenant une température de quelques centaines de kelvins. Ils espèrent ainsi obtenir de l'hydrogène métallique: un solide ordonné dans lequel les électrons circuleraient presque librement près des novaux atomiques. Une première expérience est prévue en février 2010 sur la Ligne d'intégration laser. Elle devrait être suivie d'autres sur le NIF à partir de 2011.

refroidir les lasers entre deux tirs. Or, pour des centrales par confinement laser, il faudrait parvenir au moins à un tir par seconde! »

Les recherches civiles et militaires ne sont pas totalement séparées. « La problématique est la même, assure Michel Koenig. Nous cherchons tous à atteindre les hautes densités d'énergie et à comprendre les transferts d'énergie lumineuse vers la matière. Nous collaborons sur les sujets de tre faisceaux actuels de la LIL créent des impul-

sciences fondamentales, par exemple pour comprendre le comportement des fluides à ces énergies. »

En attendant que le LMJ soit en service, les physiciens français ne restent pas passifs. Pas question, en effet, d'espérer faire des expérien-

ces sur cette énorme machine si celles-ci n'ont pas déjà été validées par des calculs poussés et testées à échelle réduite sur d'autres lasers moins intenses. Parmi ceux-ci, le plus puissant en France est la Ligne d'intégration laser (LIL), mise en service en 2002, constituée de quatre lasers du même type que ceux du LMJ: c'est un prototype de ce dernier, construit juste à côté, qui a servi à en valider les principes de fonctionnement. Cependant, l'offre européenne est trop réduite. « La LIL n'offre pas assez de tirs chaque année pour que les physiciens puissent réellement se former, constate Michel Koenig. Les scientifiques européens n'ont accès qu'à moins de 1000 tirs par an sur les lasers de plusieurs kilojoules. Le laser Oméga, à Rochester, aux États-Unis, en offre plus de 2000 à lui seul. Or, les communautés de physiciens se construisent autour des machines. Résultat : les physiciens vont vers d'autres sujets, ou travaillent ailleurs, ce qui rend plus difficile l'émergence d'une communauté de physiciens français et européens spécialistes de la fusion inertielle. »

Ces moyens devraient s'améliorer dans les années à venir. Un cinquième laser est actuellement en construction à côté de la LIL à laquelle il sera couplé. Les impulsions de ce laser ultrabref dureront 0,5 à 5 picosecondes, alors que les qua-

> sions de 20 nanosecondes. C'est le projet Petal (Petawatt Aquitaine Laser) financé par la région Aquitaine et l'Europe, qui devrait entrer en fonctionnement en 2012. Par ailleurs, lorsque le LMJ entrera en service, la part civile de la LIL passera de 20 % à 50 %.

Ce manque relatif de moyens par rapport aux États-Unis est peut-être dû au fait que la France et l'Europe ne croient pas vraiment en la fusion par confinement inertiel. Tous les espoirs, et les financements, en matière de fusion vont vers le confinement magnétique, donc vers Iter. « Lorsque le NIF aura démontré un gain de 10, c'est-à-dire une production d'énergie dix fois supérieure à l'énergie injectée, d'ici à deux ans sauf mauvaise surprise, les perspectives pourraient changer de manière importante », rappelle cependant Patrick Mora.

Peut-être aussi que les militaires ne souhaitent pas voir des recherches civiles dans des domaines sensibles, afin d'éviter la prolifération de compétences. Les recherches universitaires sur la LIL et au LMJ restent en effet sous le contrôle de la direction des applications militaires du Commissariat à l'énergie atomique, qui garde la maîtrise de ces deux équipements. ■

En savoir plus

> www-lmj.cea.fr site du Laser mégajoule

> https://lasers .llnl.gov/

site du National Ignition Facility & Photon Science.

-u.ali.www bordeaux1.fr site de l'Institut lasers

> Luc Allemand. « Mégajoule, le plus gros laser du monde », La

Recherche, janvier 2003.

et plasmas.

68 • LES DOSSIERS DE LA RECHERCHE N° 38 FÉVRIER 2010 LES DOSSIERS DE LA RECHERCHE N° 38 FÉVRIER 2010 • 69