

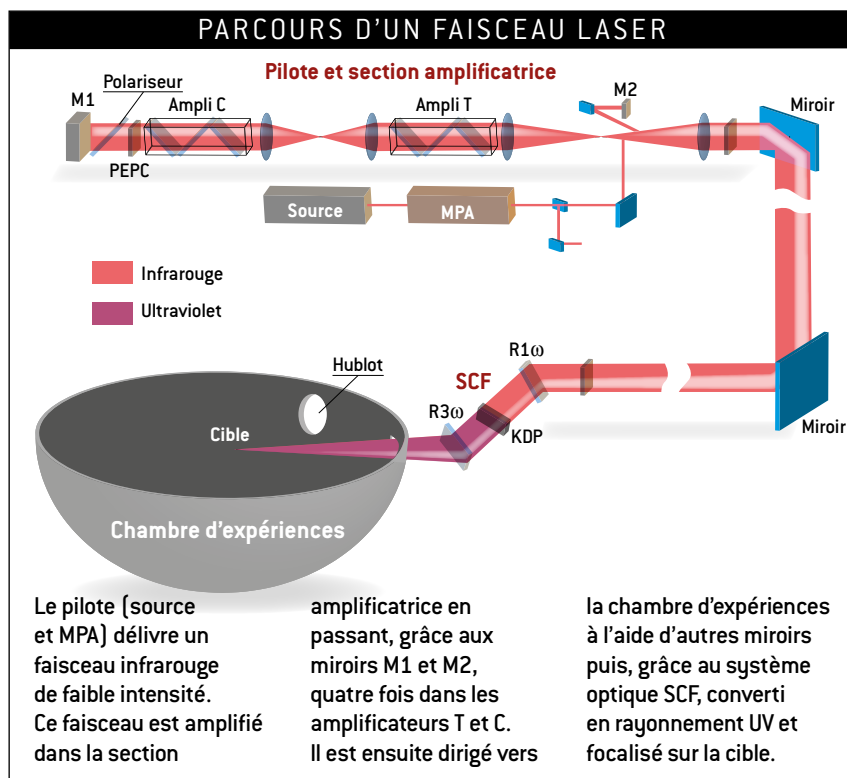
passer le faisceau lors de ses quatre passages et bloque les rayonnements parasites. La surface du miroir M1 est déformée par de petits actionneurs afin de corriger les légères modulations parasites du faisceau.

Les faisceaux se propagent ensuite sur plus de 40 mètres vers la chambre d'expériences. Les deux quadruplets de chaque chaîne sont séparés et dirigés grâce à six miroirs, l'un vers la partie supérieure et l'autre vers la partie inférieure de la chambre.

Des rayons UV très concentrés

Avant d'entrer dans cette dernière, la lumière infrarouge est convertie en rayonnement UV et focalisée au centre de la chambre. Ces deux opérations sont réalisées par le système de conversion de fréquence et de focalisation (SCF). La conversion répond aux besoins des expériences : nombre d'entre elles nécessitent un rayonnement X que seuls des rayons UV peuvent produire sur la cible de façon efficace.

Le SCF est composé d'un premier réseau de diffraction ($R1\omega$) qui dévie de 50 degrés le faisceau infrarouge, puis de deux cristaux de KDP (di-phosphate hydrogéné de potassium) qui transmettent le rayonnement avec une fréquence double puis triple de celle du faisceau incident, portant ainsi la



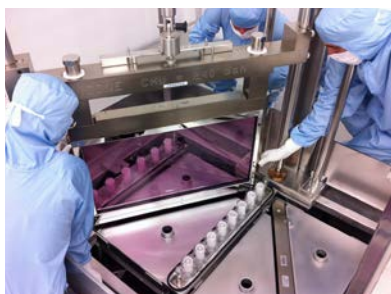
longueur d'onde à 351 nanomètres (UV). Il comporte enfin un second réseau ($R3\omega$) qui défléchit de nouveau la lumière de 50 degrés, la lumière résiduelle non convertie en UV étant bloquée par des absorbeurs, et la focalise avec une précision de pointage de 50 micromètres sur la cible.

Un projet aux défis monumentaux

Le laser Mégajoule est une installation expérimentale hors du commun, si l'on se réfère à sa taille, son coût (3,1 milliards d'euros hors taxe, aux conditions économiques de 2015) et à sa très grande complexité. Seuls les États-Unis disposent à ce jour d'une installation similaire, la National Ignition Facility, située en Californie.

Le LMJ a mobilisé pendant vingt ans plusieurs centaines de personnes au CEA et chez ses partenaires industriels. De sa conception à sa mise en service, il a fallu développer de nouvelles technologies, mettre au point de nouvelles techniques et amener l'industrie française au niveau requis pour réaliser certains systèmes.

De nombreuses PME ont atteint l'excellence technologique grâce au LMJ, telle GreenField Technology en développant les systèmes électroniques



UNE PLAQUE D'AMPLIFICATION LASER (verre phosphate dopé au néodyme) en cours de montage.

qui synchronisent les faisceaux à quelques milliardièmes de milliardième de seconde près, ou ISP System en réalisant les actionneurs des miroirs adaptatifs M1.

L'optique mérite d'ailleurs une attention particulière. Le LMJ comporte en effet quelque 7000 optiques de grandes dimensions ; en plus de leur extrême

précision de courbure et de rugosité, elles supportent des fluences (flux de lumière) jusque-là jamais atteintes.

Quant à l'accompagnement des entreprises par le CEA, l'exemple de la société SESO est notable. Le CEA a investi pendant plusieurs années dans cette société (rachetée au cours du projet par le groupe Thales pour devenir Thales/SESO) pour la doter des technologies et des machines de polissage des optiques qui la placent aujourd'hui au meilleur niveau mondial. Elle a connu récemment une forte croissance, ses effectifs passant de 70 personnes en 2012 à 100 en 2014.

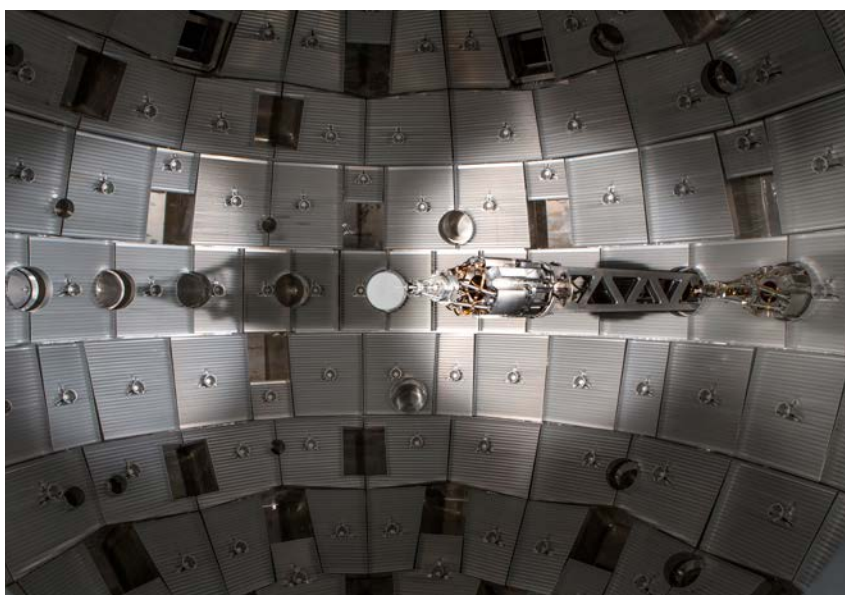
Le laser Mégajoule, avec ses exigences de performances très au-dessus des standards industriels, restera une référence de classe mondiale pour les mille entreprises qui ont contribué à sa réalisation.

La chambre d'expériences est une sphère d'aluminium de 10 mètres de diamètre percée de hublots qui permettent le passage des faisceaux laser, ainsi que le positionnement des appareils de mesure et du bras qui porte la cible. Son intérieur est vide d'air lors des expériences. Sa paroi en aluminium, de 10 centimètres d'épaisseur, est recouverte de 40 centimètres de béton dopé au bore, un élément qui absorbe efficacement les neutrons. Des panneaux d'aluminium la protègent des matériaux éjectés de la cible. Les 44 quadruplets pénètrent la chambre par autant de hublots différents.

Dans la chambre est aussi introduite la « référence commune ». Cet équipement comportant des miroirs fait partie d'un système qui permet d'aligner les SCF et les capteurs de mesure pour le diagnostic des expériences. La cible, quant à elle, est positionnée au centre de la chambre avec une précision inférieure à 10 micromètres.

Des expériences de validation et d'exploration

Le LMJ a été dimensionné pour produire, sur la cible, des températures de plusieurs dizaines de millions de degrés et des pressions dépassant le milliard de fois celle de l'atmosphère terrestre, des conditions qui



BRAS PORTE-CIBLE à l'intérieur de la chambre d'expériences, tapissée de panneaux de protection.

existent seulement au sein des étoiles et des armes nucléaires en fonctionnement.

En octobre 2014, le LMJ a été mis en service opérationnel et a réalisé avec succès ses premières expériences de physique. Il s'agissait d'étudier l'interaction du rayonnement X avec la matière : comment ce rayonnement se propage et met en mouvement très rapide cette matière. Les faisceaux laser ont atteint une pièce métallique fendue de 4 millimètres de diamètre. L'évaporation des bords de la fente a été observée pendant quelques milliardièmes de seconde. Confrontée aux résultats des calculs de prévision, cette observation permet de valider ou d'ajuster les modèles relatifs à ce phénomène.

La conversion de la lumière laser en rayonnement X et la production d'ions fortement accélérés feront également l'objet d'expérimentations. D'autres aspects du comportement de la matière dans des conditions extrêmes, tels que les instabilités hydrodynamiques et la turbulence, seront examinés. Certaines cibles comporteront des mélanges fusibles de deutérium et de tritium pour tester les modèles de fonctionnement des armes thermonucléaires, dans lesquelles une telle fusion se produit.

Ces phénomènes de fusion ou de turbulence interviennent également lors de l'explosion des étoiles ; aussi le LMJ offre-t-il la possibilité exceptionnelle de mettre à l'épreuve des modèles de fonctionnement stellaire. Entre 20 et 25 % du temps d'expérience seront accessibles à la communauté académique pour explorer la physique mal connue des hautes densités d'énergie. ■

Le programme Simulation

Lancé en 1996, le programme Simulation vise à pérenniser la dissuasion française après l'arrêt définitif des essais nucléaires. Il a été bâti pour permettre le renouvellement et la garantie sur le long terme des armes qui équipent les composantes aéroportée et océanique de la dissuasion nucléaire française.

L'atteinte de tels objectifs a nécessité de développer ce programme suivant trois axes. Le premier axe porte sur la physique des armes nucléaires et consiste à établir les équations qui modélisent les phénomènes intervenant lors du fonctionnement de ces armes. Le deuxième axe est celui de la simulation numérique, qui regroupe l'écriture des applications informatiques et l'acquisition des calculateurs de puissance nécessaires à la résolution de ces équations. Le troisième axe est la validation

expérimentale : des expériences menées en laboratoire sont destinées à valider les différents modèles, séparément ou dans leur enchaînement.

Le laser Mégajoule (LMJ) est l'un des deux grands équipements sur lesquels s'appuie la validation expérimentale, l'autre étant l'installation de radiographie Épure, située en Côte-d'Or. Épure sert à étudier le comportement des matériaux dans la phase dite pré-nucléaire qui précède la libération de l'énergie nucléaire (le « fonctionnement nucléaire ») d'une arme, tandis que l'énergie du LMJ déposée sur une cible y crée des conditions de température et de pression relevant des hautes densités d'énergie, similaires à celles du fonctionnement nucléaire d'une arme et présentes également au cœur des étoiles.