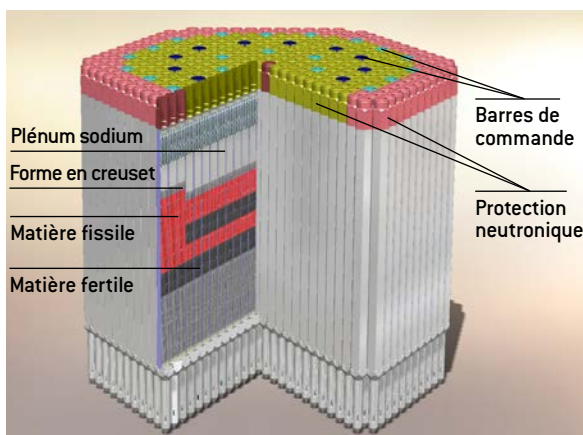


Le cœur innovant du réacteur Astrid

Breveté en 2010, le cœur « à faible vidange » (CFV) est l'un des principaux éléments qui différencient la conception d'Astrid de celle des RNR précédents. L'enjeu, pour les équipes du CEA et de ses partenaires, était de développer un cœur dont la réactivité diminue en cas de fuite de sodium, jusqu'à l'arrêt des réactions nucléaires.

Le sodium ralentit un peu, réfléchit ou capture les neutrons. Par conséquent, sa disparition ou sa dilatation locale dans le cœur entraîne une variation de la réactivité, qui résulte de deux effets antagonistes : un effet positif, dû au fait que les neutrons sont moins ralentis et moins capturés, et un effet négatif, lié à l'augmentation des fuites de neutrons hors du cœur. Le taux de fuite de neutrons diminuant avec l'augmentation de la taille du cœur, l'effet d'une vidange du sodium sur la réactivité est largement positif pour les grands cœurs de forte puissance de conception traditionnelle, ce qui constitue une problématique de sûreté délicate à gérer pour les RNR-Na. Pour obtenir un effet négatif – voire faible – sur la réactivité,



LE CŒUR D'ASTRID
à faible effet de réactivité en cas de vidange du sodium [vue en coupe].

non fissile placée à environ mi-hauteur du cœur ; le concept de cœur « en creuset », dans lequel la différence de hauteur des zones fissiles interne et externe

le CEA a développé avec ses partenaires un cœur dont le principe est d'amplifier la composante de fuite, grâce à la combinaison de plusieurs dispositions géométriques : la réduction de la proportion volumique du sodium dans le cœur, obtenue en diminuant le diamètre du fil espaceur situé entre les aiguilles de combustible ; le concept de plénum sodium, qui se matérialise sous la forme d'une cavité remplie de sodium et placée au-dessus du faisceau d'aiguilles, à l'intérieur des assemblages combustibles (ce plénum, en situation vidangée, favorise la fuite des neutrons hors du cœur), et celui d'un cœur à géométrie hétérogène, avec une plaque

augmente l'effet de fuite des neutrons du plénum et contrebalance ainsi l'apport de réactivité en cas de vidange.

Les développements réalisés se sont appuyés sur les résultats d'études expérimentales et de simulations numériques. Pour maîtriser la spécificité du cœur CFV et certifier les calculs, plusieurs programmes ont été menés par les équipes du CEA. Il s'agit en particulier d'essais effectués en Russie sur un réacteur expérimental et d'analyses comparatives menées indépendamment par le CEA et le DOE (le Department of Energy des États-Unis), qui ont toutes les deux confirmé les performances de ce cœur.

« Le CEA a développé des partenariats internationaux afin de renforcer et multiplier ses efforts de R&D. »

les pompes électromagnétiques (destinées à faire circuler le sodium dans la boucle secondaire) ; Airbus Defence and Space intervient sur la fiabilité et sûreté de fonctionnement ; Alcen sur les cellules d'examen des objets irradiés ; JAEA, MHI et MFBR, sur la conception de systèmes de sûreté d'Astrid et sur la R&D associée ; Rolls-Royce sur les échangeurs compacts sodium-gaz et la manutention du combustible ; Velan sur la conception et le développement de vannes d'isolement du sodium sur la boucle secondaire, et Technetics Group France sur le développement de systèmes d'étanchéité en environnement sodium.

En parallèle, le CEA a développé un ensemble de partenariats internationaux afin de renforcer et multiplier ses efforts de R&D. Ils permettent de partager les coûts de développement et d'utilisation d'infrastructures expérimentales lourdes, telles

que les laboratoires d'études en sodium ou d'études des matériaux irradiés.

En Europe, les partenariats sont inscrits soit au niveau communautaire, sous l'égide de l'initiative ESNII dédiée aux programmes de quatrième génération, soit sous forme d'un ensemble de coopérations bilatérales dans le cadre du réseau de coopération Ardeco (Astrid R&D European Cooperation).

Hors Europe, ils procèdent d'initiatives multilatérales (le GIF évoqué précédemment) ou bilatérales, avec le Japon, dans le cadre d'un accord important signé avec les ministères MEXT et METI autour de la R&D et de l'ingénierie, avec la Russie, à travers un accord avec Rosatom pour des irradiations expérimentales de combustibles, avec l'Inde à travers l'IGCAR pour la sûreté, avec le Department of Energy des États-Unis pour des études de neutronique et de sûreté. Enfin, des contacts avec la Chine ont été noués en vue d'un futur partenariat. ■

Des lasers **ultrabrefs**

Philippe Martin

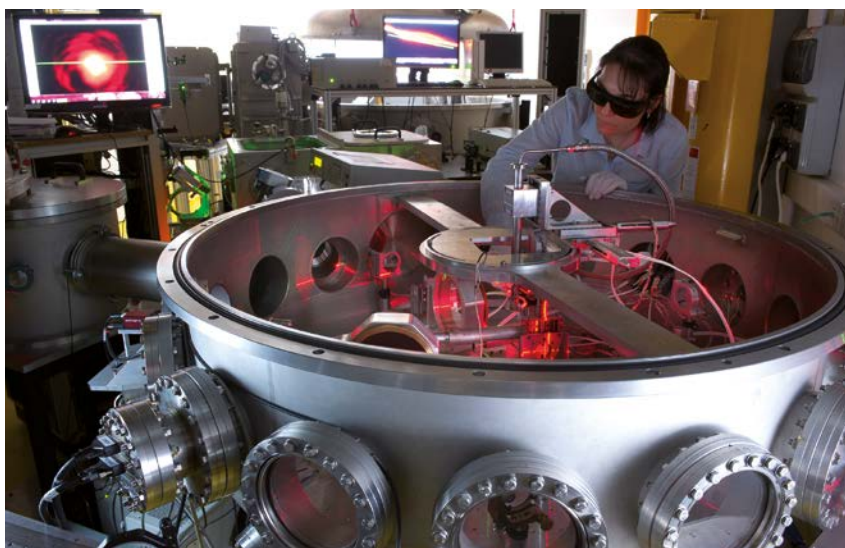
La production de rayons lumineux d'une brièveté inouïe donne l'accès à de nouveaux moyens d'observation et à d'autres outils inédits.

Voir des électrons se déplacer, les propulser à la vitesse de la lumière... voilà des utilisations du laser qui n'ont probablement pas été imaginées lors de son invention !

Les lasers « ultrabrefs » sont caractérisés par la brièveté de leurs impulsions : quelques femtosecondes ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$), soit seulement quelques oscillations du champ électromagnétique dans le cas d'une lumière visible. Cette fugacité leur impose un très large spectre de fréquences, comme l'indique le principe de Fourier selon lequel seul un nombre infini d'oscillations permet de définir une fréquence unique et précise. Ainsi, contrairement à une idée répandue, un laser n'est pas nécessairement monochromatique.

On connaît aujourd'hui deux intérêts majeurs présentés par les lasers ultrabrefs.

D'une part, ils sont à l'origine d'une science récente, dite ultrarapide. Par exemple, dans une expérience « pompe-sonde », une première impulsion (la pompe) excite un système moléculaire en fragmentant des molécules ; grâce à la seconde impulsion (la sonde), l'état du système peut être connu un bref instant après l'excitation. Il est ainsi possible de décrire une séquence très rapide de ruptures ou de formations de liaisons chimiques, avec la perspective de les contrôler. Depuis quelques années, on sait même utiliser ces lasers pour produire des impulsions lumineuses mille fois plus courtes, de quelques attosecondes ($1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$), grâce auxquelles on peut suivre « pas à pas » le déplacement d'électrons dans la matière ! Le laboratoire Attolab, un équipement d'excellence financé par le programme Investissements d'avenir, est dédié à ce nouveau champ d'études parfois nommé attoscience. Il doit être mis en service en 2016 à l'université Paris-Saclay. Les physiciens



© P. Stropia/CEA

L'ENCEINTE D'INTERACTION du laser UHI100 (100 térawatts de puissance crête) en cours de mise au point au CEA-Saclay.

et les chimistes qui l'utiliseront pourront réaliser des observations avec une résolution d'une attoseconde dans le temps et d'un angström (10^{-10} m) dans l'espace.

**Plus de 100 fois
la puissance électrique
mondiale**

D'autre part, en concentrant fortement l'énergie lumineuse dans le temps, ces lasers atteignent des puissances instantanées gigantesques, de l'ordre du pétawatt ($1 \text{ PW} = 10^{15} \text{ watts}$) ; on parle de laser UHI (ultra-haute intensité). Ainsi, un seul d'entre eux, occupant quelques centaines de mètres carrés seulement, délivre un faisceau de lumière dont la « puissance crête » est plus de cent fois supérieure à toute la puissance électrique produite dans le monde – mais cela pendant quelques femtosecondes uniquement !

Le laser Mégajoule (LMJ), quant à lui, atteint une telle puissance mille fois plus longtemps. Cependant, les lasers UHI offrent des perspectives scientifiques différentes du LMJ car il est possible de les focaliser sur une surface de quelques micromètres carrés, où ils créent un champ électromagnétique si intense qu'il peut propulser des électrons à 99,999 % de la vitesse de la lumière.

Des études sont menées dans différents pays pour construire des accélérateurs de particules très compacts recourant aux lasers UHI. Les applications envisagées concernent la recherche fondamentale en général et la médecine en particulier : la destruction de cellules tumorales par un faisceau de particules rapides (radiothérapie) pourrait tirer profit d'accélérateurs à la fois plus compacts et moins chers. ■

Philippe MARTIN est chercheur à l'Iramis, Institut rayonnement matière du CEA-Saclay. Il y dirige le Laboratoire interactions, dynamiques et lasers.

Mégajoule, laser de l'extrême

Pierre Vivini et Charles Lion

Vingt ans d'études et de travaux, 400 000 milliards de watts concentrés sur une cible millimétrique par 176 faisceaux de lumière pendant quelques milliardièmes de seconde... voici le laser Mégajoule !

Le laser Mégajoule (LMJ) est un grand équipement scientifique dédié à la réalisation des expériences de physique nécessaires à la pérennisation de la force de dissuasion nucléaire française. Au sein de cette installation, des faisceaux laser de très forte puissance sont créés puis concentrés sur une cible. La caractérisation des interactions de ces faisceaux avec la cible (dont la nature varie en fonction des expériences) permet de valider les modèles utilisés pour la

Pierre VIVINI est ingénieur à la Direction des applications militaires (DAM) du CEA. Il est le chef du projet laser Mégajoule (LMJ). Charles LION dirige le programme Simulation à la DAM.

garantie des armes nucléaires et, plus largement, d'explorer la physique des hautes densités d'énergie.

Le bâtiment qui abrite le LMJ mesure environ 300 mètres de long, 100 de large et 50 de haut, ce qui lui confère une taille gigantesque comparée aux dimensions millimétriques de la cible.

Dans la configuration nominale, 176 faisceaux laser infrarouges sont générés dans quatre grands « halls laser », puis sont amplifiés avant d'être convertis en lumière ultraviolette (UV) et focalisés au centre de la chambre d'expériences. L'énergie totale transportée par les faisceaux peut atteindre 1,4 mégajoule sur une durée comprise entre 0,3 et 25 nanosecondes (milliardièmes de seconde), soit une puissance maximale de 400 térawatts ($1 \text{ TW} = 10^{12} \text{ watts}$).

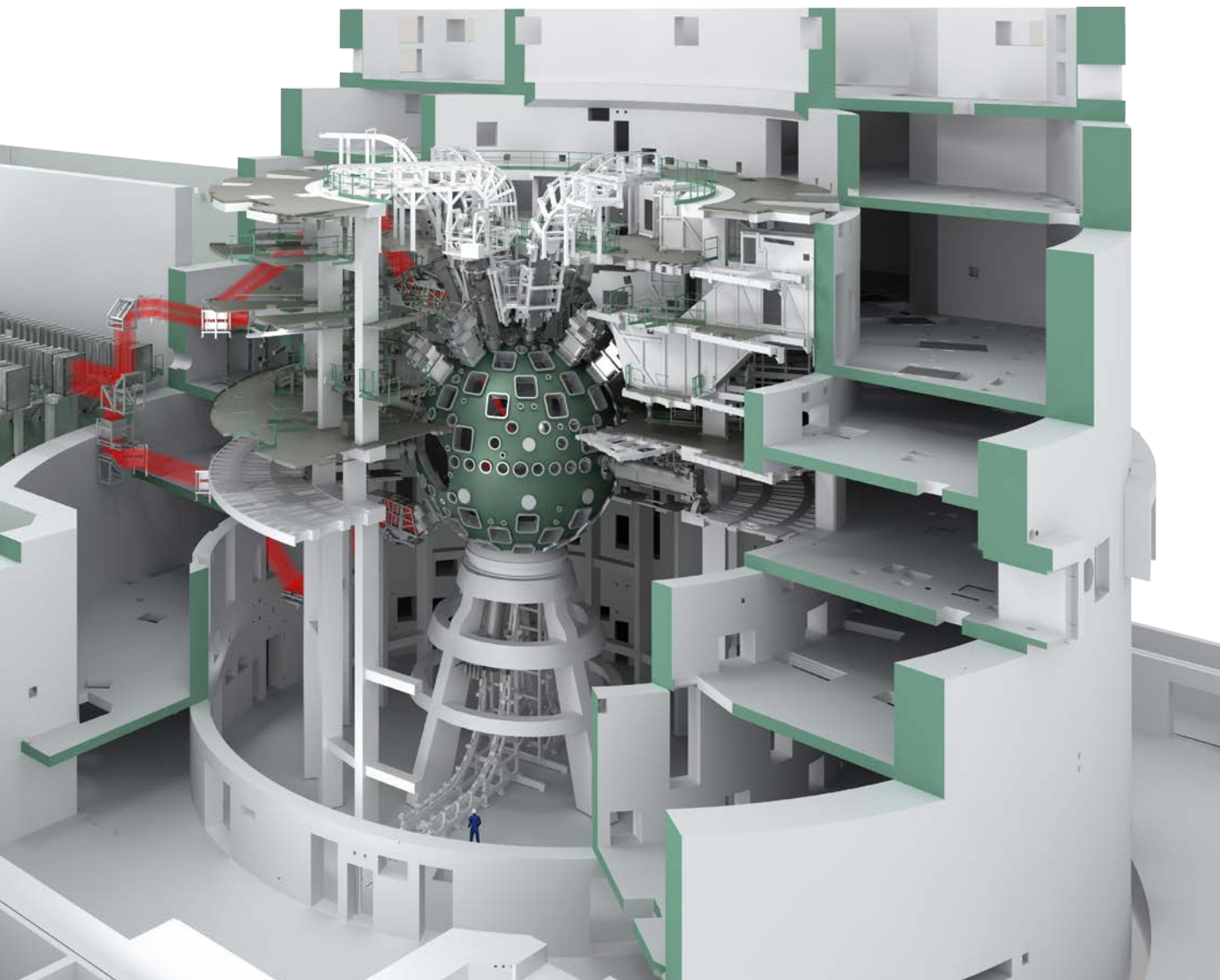
Le fonctionnement du LMJ fait appel à deux grands sous-systèmes : le « sous-système laser », qui produit et transporte les faisceaux jusqu'à la chambre d'expériences et le « sous-système expériences » où les lasers atteignent leur cible et qui assure le recueil des données expérimentales en temps réel.

Le sous-système laser est distribué dans 22 chaînes réparties dans les quatre halls,



© Lilian Marolleau/CEA

LE BÂTIMENT DU LMJ, situé au Barp (Gironde), au sein du Cesta, le Centre d'études scientifiques et techniques d'Aquitaine. De part et d'autre du hall d'expériences s'étendent les quatre halls laser. L'ensemble mesure près de 300 mètres de long.



© Image 3D – www.beview.fr / CEA

LE LASER MÉGAJLOULE. Cette vue schématique montre trois chaînes d'amplification [qui comportent chacune huit faisceaux laser] parmi les vingt-deux chaînes du LMJ, et le hall d'expériences avec la chambre d'expériences en son centre.

chaque chaîne produisant deux groupes de quatre faisceaux ou « quadruplets ». Il comporte un « pilote », une « section amplificatrice » et un « système de conversion de fréquence et de focalisation ».

Une amplification gigantesque

Le pilote comporte deux sous-ensembles : la source (une par hall laser) et le module préamplificateur (MPA).

La source crée l'impulsion lumineuse et la met en forme temporellement et « spectralement ». La longueur d'onde du faisceau infrarouge est alors de 1053 nanomètres avec une variation maximale, de part et d'autre de cette valeur, de 5 picomètres ($1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m}$). Cette stabilité est cruciale

pour le bon fonctionnement du LMJ. En sortie de la source, l'énergie du faisceau est de un nanojoule.

Le MPA (il y en a quatre par chaîne) a pour fonction de réaliser une préamplification du faisceau pour amener son énergie au niveau du joule. Ce gain d'un facteur un milliard est obtenu par un passage dans une cavité régénérative et par quatre passages dans un amplificateur. De plus, le MPA met en forme spatialement le faisceau ; il ajuste ainsi la répartition de son énergie.

Le rayonnement infrarouge qui sort du pilote doit encore être amplifié dans la section amplificatrice afin d'atteindre l'énergie requise pour les expériences : jusqu'à 18 kilojoules. Cette amplification est acquise par quatre passages au travers

de deux amplificateurs (T et C) constitués de plaques de verre phosphate dopé au néodyme qui stockent puis restituent l'énergie fournie par des lampes flash. Faire passer ainsi le faisceau quatre fois dans deux amplificateurs, plutôt qu'une fois dans huit amplificateurs, permet de limiter la longueur de la chaîne, donc celle du bâtiment, et le nombre de plaques nécessaires.

Positionnées entre les deux amplificateurs, des lentilles associées à un diaphragme suppriment les modulations parasites. Deux miroirs, M1 et M2, assurent les allers-retours du faisceau. En bout de chaîne se trouve la cellule de Pockels à électrodes plasma (PEPC), un élément de protection de la chaîne laser. Associée à un polariseur, elle constitue un obturateur optique qui laisse

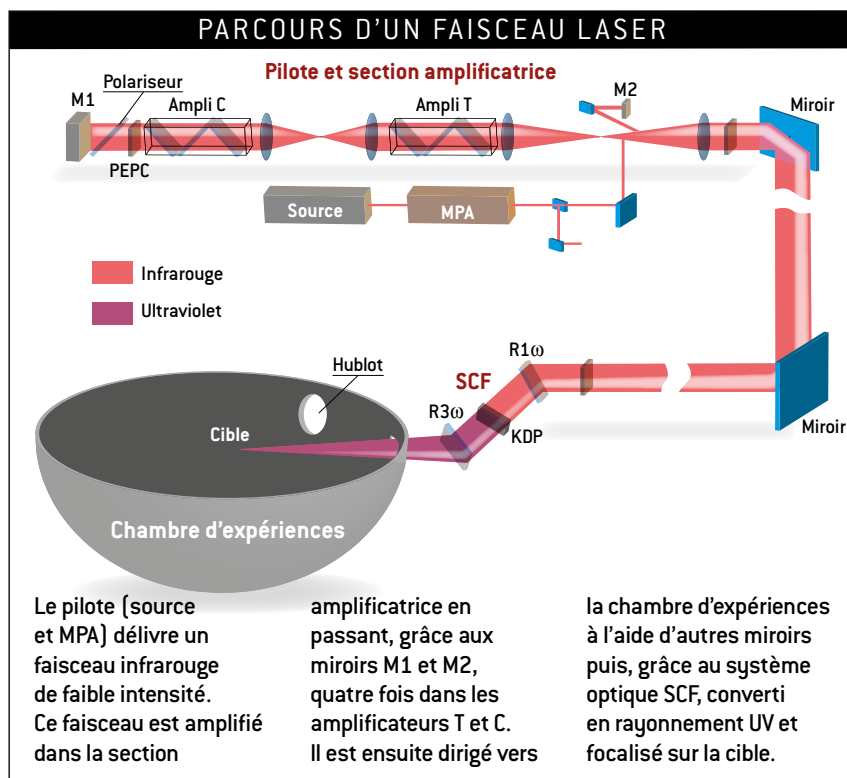
passer le faisceau lors de ses quatre passages et bloque les rayonnements parasites. La surface du miroir M1 est déformée par de petits actionneurs afin de corriger les légères modulations parasites du faisceau.

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



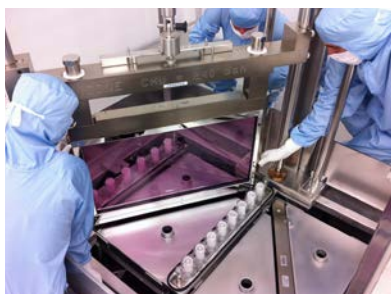
longueur d'onde à 351 nanomètres (UV). Il comporte enfin un second réseau ($R3\omega$) qui défléchit de nouveau la lumière de 50 degrés, la lumière résiduelle non convertie en UV étant bloquée par des absorbeurs, et la focalise avec une précision de pointage de 50 micromètres sur la cible.

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.

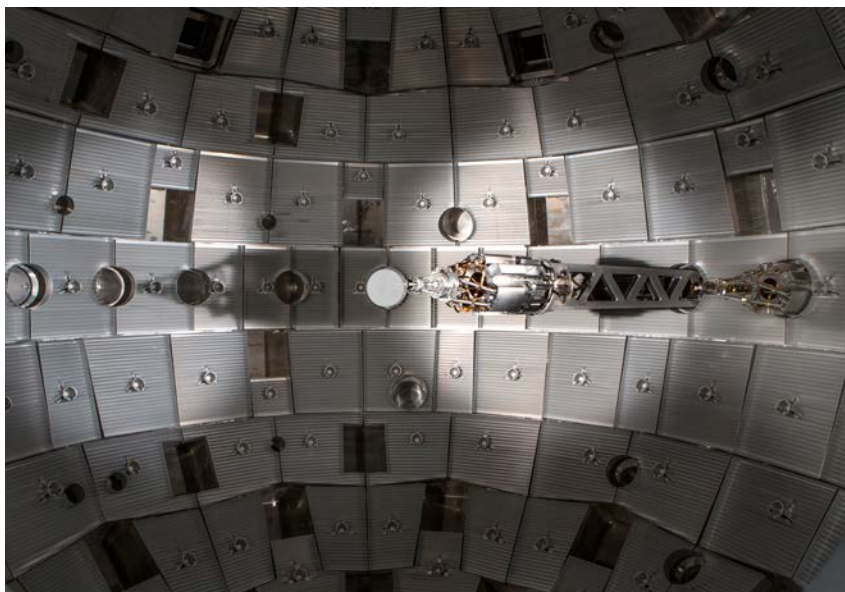
Le laser Mégajoule, avec ses exigences de performances très au-dessus des standards industriels, restera une référence de classe mondiale pour les mille entreprises qui ont contribué à sa réalisation.

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.



UNE SCINTIGRAPHIE effectuée au Service hospitalier Frédéric-Joliot du CEA, à Orsay.

Mieux voir le corps

Régine Trebossen et Patrick Philipon

Fort de son expertise en physique nucléaire, le CEA est devenu peu de temps après sa création un acteur majeur de l'innovation en imagerie médicale. Celle-ci a bouleversé le diagnostic médical et, plus largement, la médecine.

Examiner l'intérieur d'un matériau ou celui d'un organisme vivant sans l'ouvrir n'est plus un rêve depuis la découverte des rayons X par Wilhelm Röntgen, en 1895. La plupart des avancées réalisées dans ce domaine

Régine TREBOSSEN est coordonnatrice exécutive de l'infrastructure France Life Imaging et de la communication à l'Institut d'imagerie biomédicale du CEA, au service hospitalier Frédéric-Joliot. Patrick PHILIPON est journaliste scientifique.

dérivent directement de la recherche en physique nucléaire et des développements technologiques qu'elle implique, en électronique, en matériaux, en informatique, en robotique...

C'est un autre « pionnier des rayonnements », Frédéric Joliot, qui a grandement contribué à lancer le CEA sur la voie de l'imagerie médicale. Cet ensemble de techniques permet d'observer les organes et leur fonctionnement, de diagnostiquer des maladies, de valider de nouveaux traitements et d'évaluer leurs bénéfices. L'imagerie nucléaire et l'imagerie par résonance magnétique (IRM) font partie de ces applications devenues