

Des lasers **ultrabrefs**

Philippe Martin

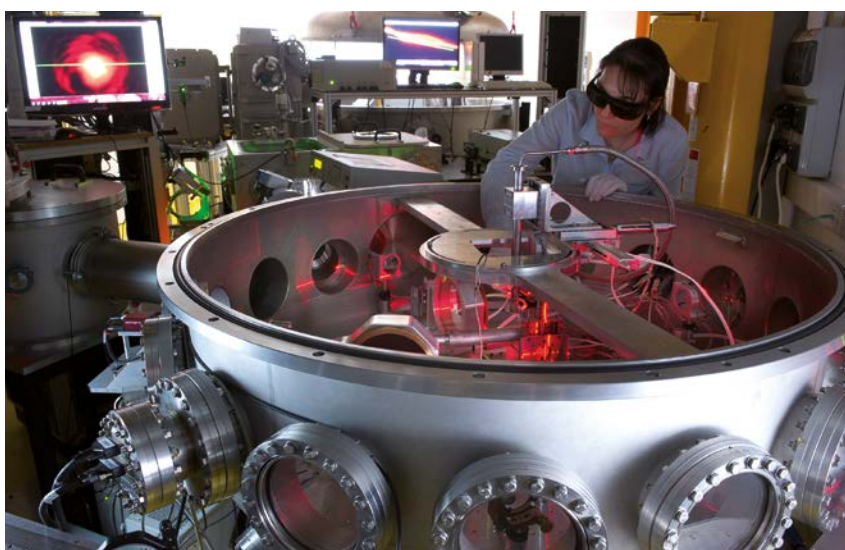
La production de rayons lumineux d'une brièveté inouïe donne l'accès à de nouveaux moyens d'observation et à d'autres outils inédits.

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 TW = 10^{12} watts).

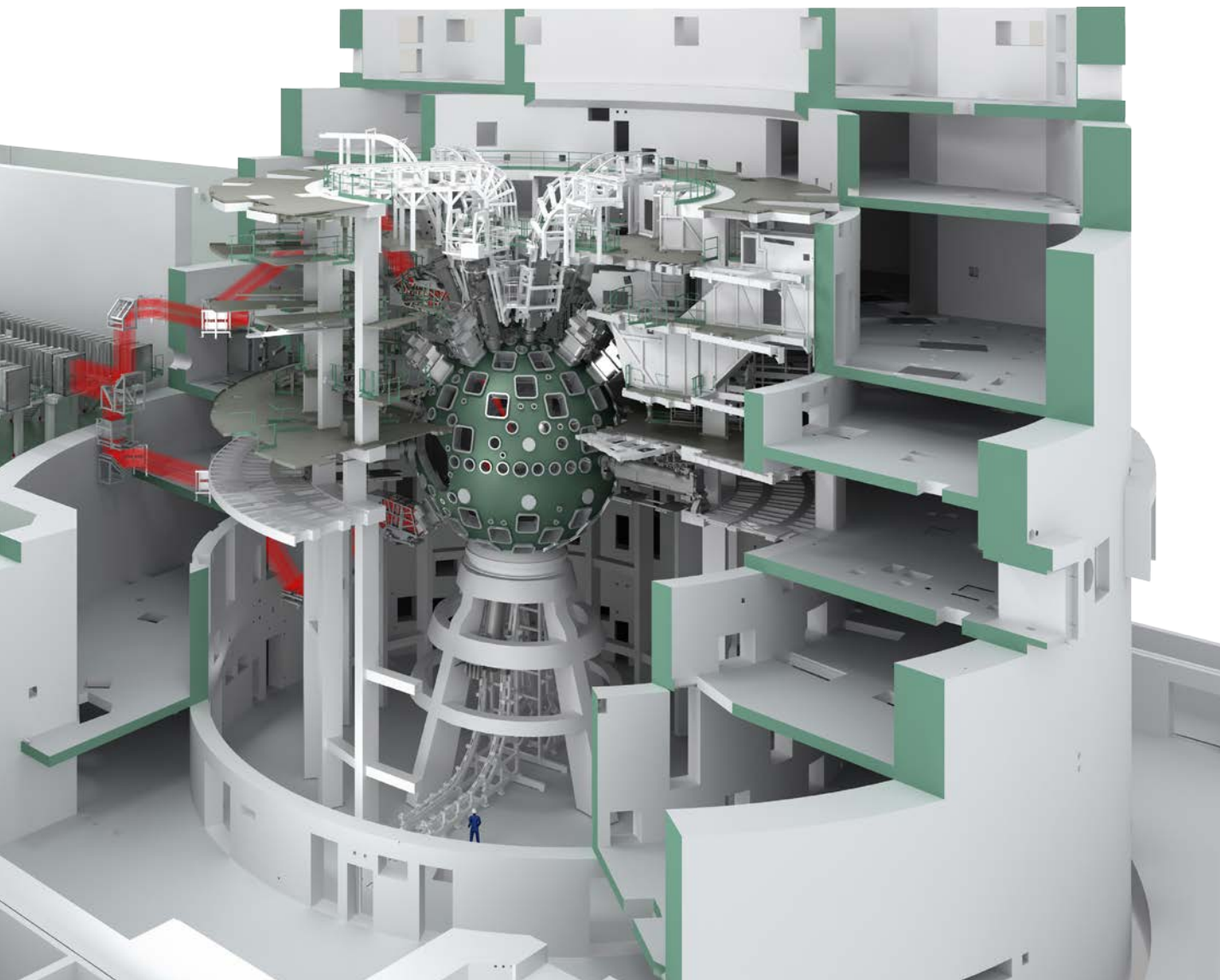
Le fonctionnement du LMJ fait appel à deux grands sous-systèmes : le « sous-système laser », qui produit et transporte les faisceaux jusqu'à la chambre d'expériences et le « sous-système expériences » où les lasers atteignent leur cible et qui assure le recueil des données expérimentales en temps réel.

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



© Ulian Marcilieu/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.bevier.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