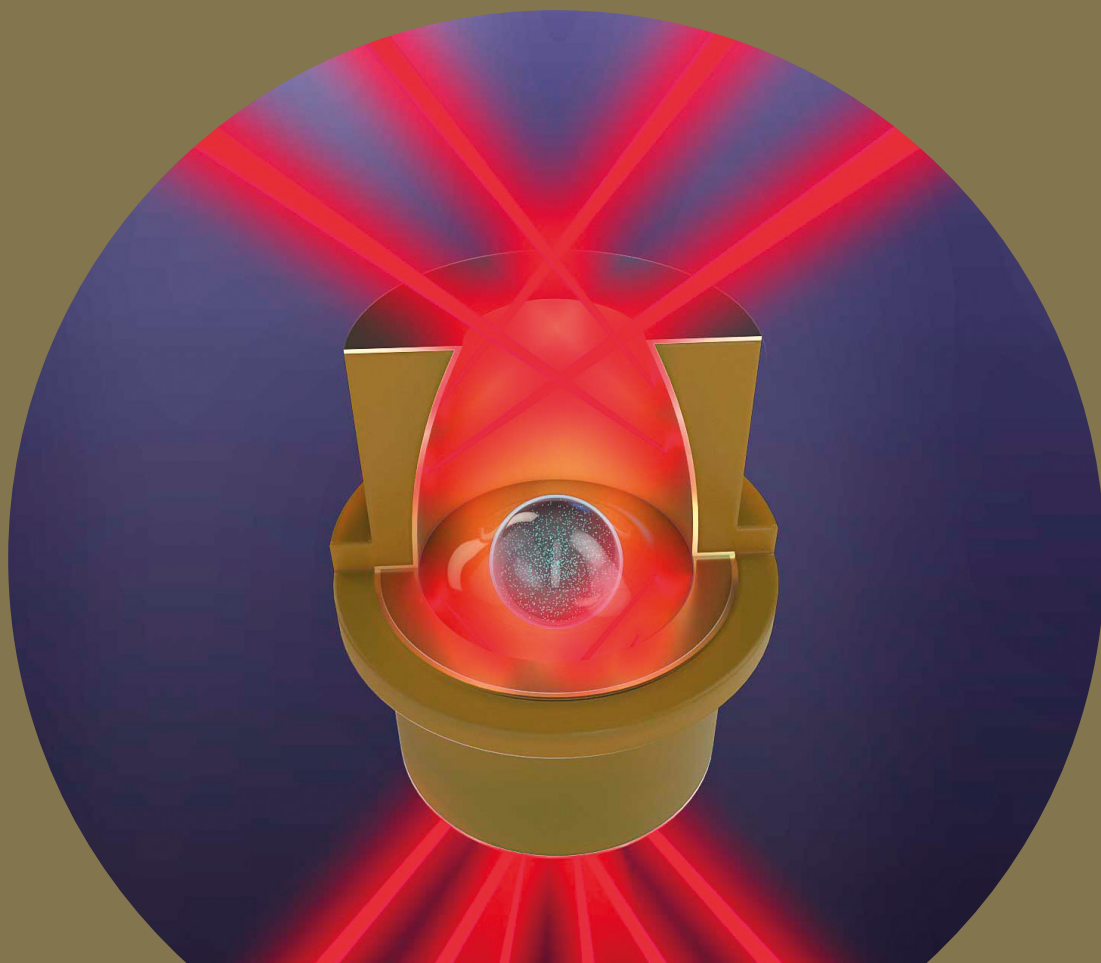
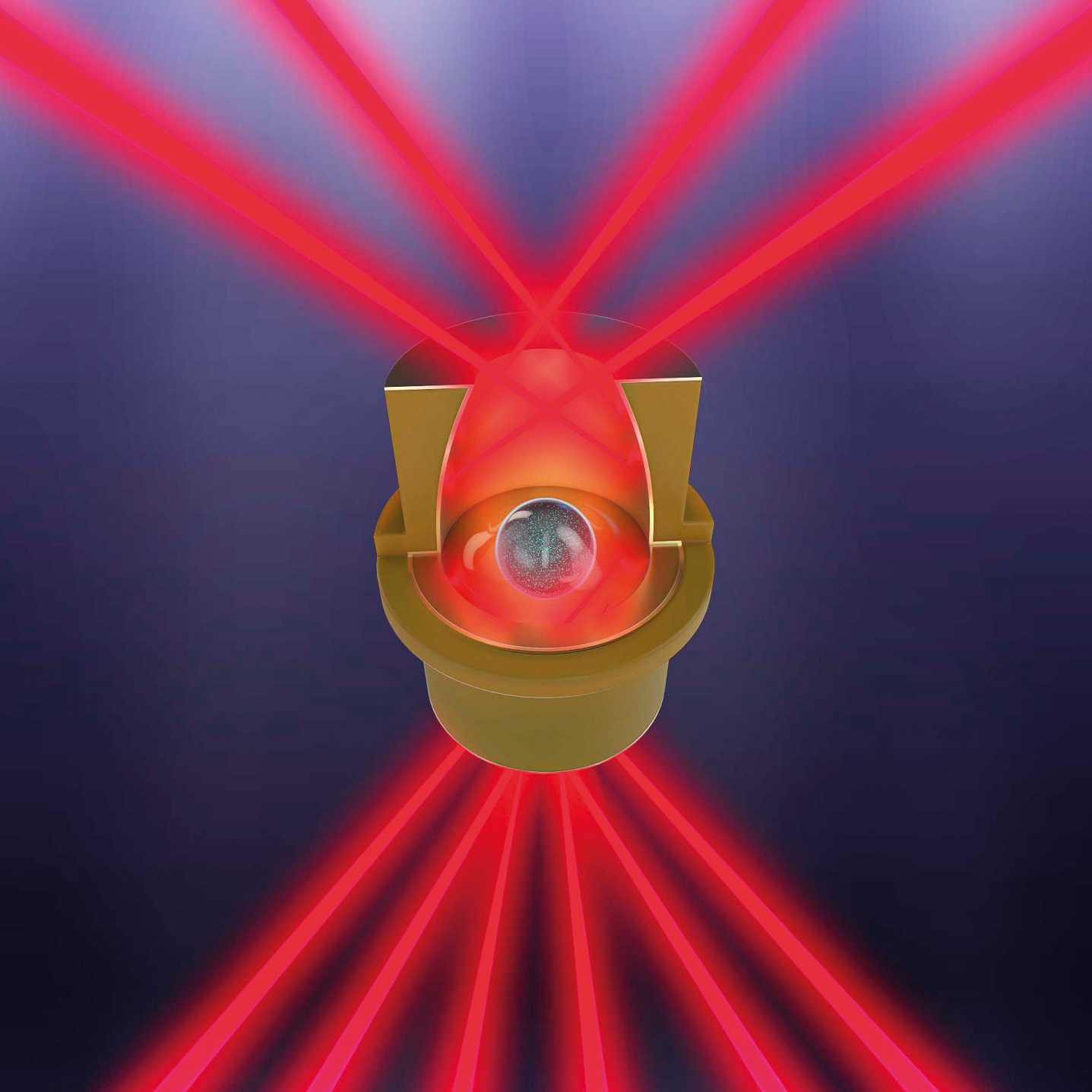




PREMIÈRE EXPÉRIENCE
DE FUSION NUCLÉAIRE
AU LASER MÉGAJoule



SOMMAIRE

1.	Le programme Simulation	5
2.	Le Laser Mégajoule (LMJ)	7
3.	L'ouverture académique du LMJ	8
4.	Les retombées économiques du LMJ	9
5.	Les catégories d'expériences de physique sur le LMJ	9
6.	La fusion thermonucléaire	11
7.	La fusion par confinement inertiel	12
8.	Les dispositifs de mesure	14
9.	Les microcibles des expériences de fusion	15
10.	La première expérience de fusion en 2019	16
11.	Les objectifs scientifiques de la campagne expérimentale de fusion	18

1. LE PROGRAMME SIMULATION

La dissuasion française repose sur la garantie de sûreté et de fiabilité des armes nucléaires. Apporter cette garantie au Président de la République est l'une des missions régaliennes de la Direction des applications militaires du CEA (la DAM).

Pour être dissuasives, les armes nucléaires sont conçues pour pénétrer les défenses adverses. Elles évoluent donc autant que nécessaire pour conserver l'avantage stratégique sur ces défenses.



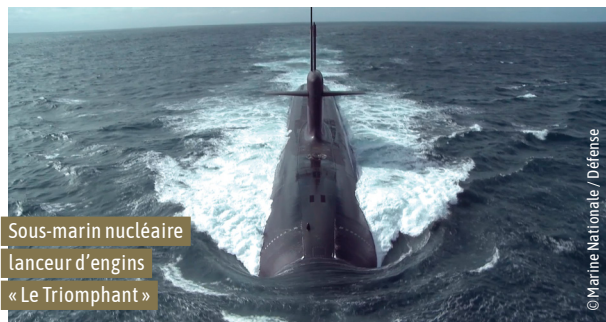
Avion Rafale et missile ASMPA

emportant une « maquette de tête nucléaire aéroportée (TNA) »

© R. Nicolas-Nelson-Armée de l'air

Toute évolution des armes nucléaires françaises nécessite d'apporter la garantie de leurs performances. Depuis 1996, la France n'a plus recours à des essais nucléaires pour apporter cette garantie, mais à une démarche scientifique : la Simulation.

La Simulation s'appuie sur les résultats des essais nucléaires passés et sur trois piliers : un enchaînement d'équations mathématiques qui modélisent la physique du fonctionnement d'une arme nucléaire (on parle de « code de simulation »), des supercalculateurs qui permettent de résoudre numériquement ces équations complexes et des installations expérimentales dans lesquelles certains phénomènes physiques peuvent être mesurés à l'échelle d'un laboratoire. En confrontant les résultats des expériences aux prévisions des simulations numériques, la précision des modèles physiques peut être estimée et ces modèles, ajustés pour mieux restituer la réalité physique. Le code de simulation, ainsi amélioré, est également confronté aux résultats des essais nucléaires passés qui sont régulièrement réinterprétés. Ces itérations successives de confrontation aux expériences et d'amélioration des modèles constituent la démarche de Simulation au service des programmes pilotés par la DAM.



Sous-marin nucléaire
lanceur d'engins
« Le Triomphant »

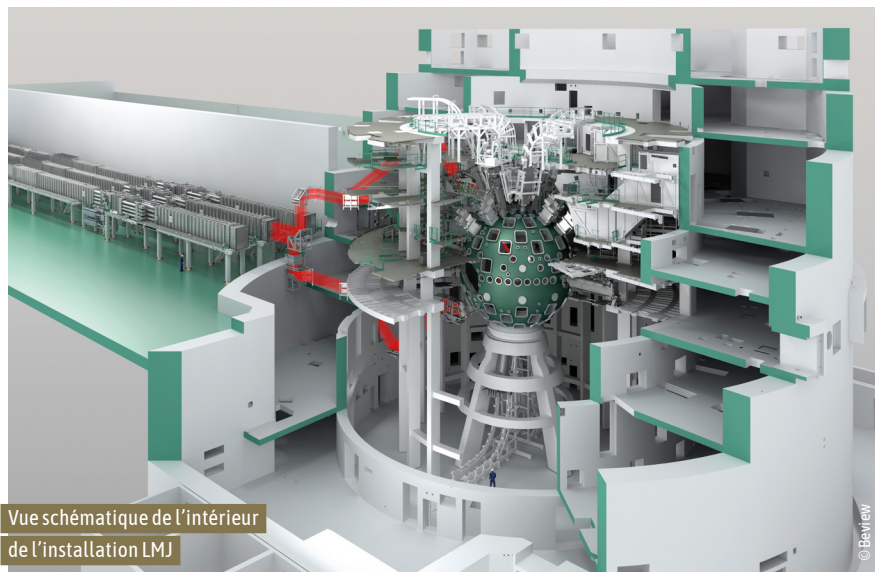
© Marine Nationale / Défense

Pour chaque programme de renouvellement des armes nucléaires, il est nécessaire de mettre au point un outil de simulation numérique, à la précision compatible avec les exigences du programme. Il faut pour cela réaliser plusieurs milliers de calculs et quelques expériences bien choisies. Une fois validé sur ces expériences et sur un périmètre d'essais nucléaires passés, cet outil – on parle de « standard de calcul » – est utilisé pour concevoir et garantir l'arme qui permet de satisfaire les spécifications du programme. Là encore, ce sont des milliers de calculs et quelques expériences de physique qui permettent de dimensionner cet objet et d'en garantir la sûreté et la fiabilité conformément aux spécifications requises par la Défense.

Le fonctionnement d'une arme nucléaire fait intervenir un grand nombre de phénomènes physiques complexes. Ceux qui se déroulent durant la phase de dégagement d'énergie nucléaire de l'arme sont caractérisés par des niveaux de pression, de densité et de température difficiles à reproduire en laboratoire. **Dans le cadre du programme Simulation, le Laser Mégajoule est une installation exceptionnelle par ses dimensions et sa complexité, que la DAM a conçue pour créer ces états de la matière à l'échelle d'un laboratoire.** Il s'agit d'un laser de puissance capable de concentrer des énergies lumineuses importantes sur de très petits volumes et dans des temps extrêmement brefs. Pour valider la modélisation de la phase nucléaire des armes de la dissuasion française, la DAM réalise donc depuis fin 2014 plusieurs types d'expériences sur le Laser Mégajoule, dans des domaines très variés.



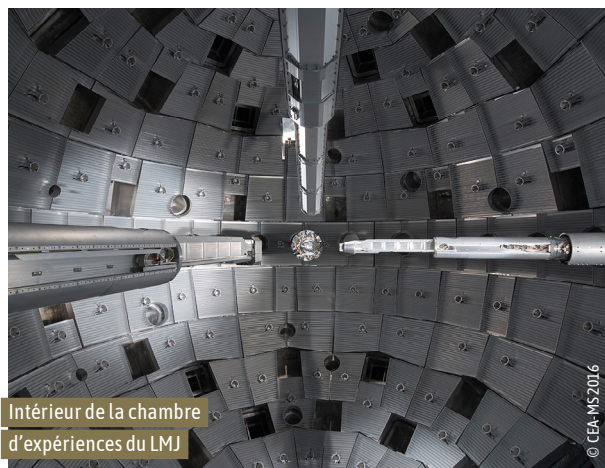
2. LE LASER MÉGAJOULE (LMJ)



8 faisceaux laser délivraient une énergie de 20 kJ et, fin 2019, pour les premières expériences de fusion nucléaire, 48 faisceaux délivraient une énergie de 160 kJ.

La chambre d'expériences est constituée d'une sphère d'aluminium de 10 mètres de diamètre recouverte de béton. Les faisceaux laser et les dispositifs de mesure du plasma sont pointés au centre de cette chambre avec une précision meilleure qu'un dixième de millimètre, et déclenchés avec une synchronisation meilleure qu'un dix-milliardième de seconde.

Le LMJ est une installation expérimentale hors du commun, construite sur le centre CEA du Cesta (à proximité de Bordeaux). Le bâtiment a des dimensions imposantes (environ 300 mètres de long, 150 mètres de large et 50 mètres de haut), surtout lorsqu'on les compare à la taille millimétrique des cibles qui y sont expérimentées. La chambre d'expériences se trouve au centre du hall d'expériences. Dans la configuration finale du LMJ, 176 faisceaux délivrant une énergie de 1,3 MJ seront focalisés sur la cible placée au centre de la chambre d'expériences. Depuis sa mise en service en 2014, la montée en puissance progressive du Laser Mégajoule se poursuit, de manière cohérente entre l'énergie laser (mise en service des faisceaux laser) et le système expérimental (une quarantaine de systèmes de mesure ou diagnostics seront installés à terme). Ainsi, fin 2014,



3. L'OUVERTURE ACADÉMIQUE DU LMJ



Section amplificatrice du faisceau laser PETAL dans le hall laser sud-est de l'installation LMJ

Formidable installation scientifique destinée à l'étude de la physique des armes nucléaires, le LMJ permet aussi, plus généralement, de progresser dans la connaissance des milieux à hautes densités d'énergie – en particulier par l'étude en laboratoire de phénomènes astrophysiques – et à forte pression – comme les équations d'état des constituants des planètes.

Un faisceau laser supplémentaire spécifique, PETAL (voir photo), financé par la région Nouvelle-Aquitaine, l'État et l'Union européenne, a été couplé à l'installation LMJ pour étendre les possibilités expérimentales de l'installation. Caractérisé par une impulsion laser environ 10 000 fois plus intense, PETAL permet de produire des sources de rayonnement et des états de matière complémentaires à ceux produits par LMJ.

Une partie du temps d'expérience sur l'installation LMJ-PETAL est ouvert à la communauté académique internationale, via un appel à proposition organisé par l'Association Laser et Plasmas. La première expérience de physique pour la recherche académique a été réalisée sur cette installation fin 2017.

4. LES RETOMBÉES ÉCONOMIQUES DU LMJ

Le projet Laser Mégajoule mobilise depuis 20 ans des centaines de personnes au CEA et chez les partenaires industriels. De la conception à la mise en service, il a fallu innover, développer, créer les techniques et les technologies nécessaires, et amener l'industrie française au niveau requis pour permettre ces réalisations. Près de 1 000 entreprises des secteurs du bâtiment, de la Défense et de la mécanique, ainsi que de très nombreuses PME de haute technologie, y ont participé. Plus de 95 % du LMJ a été réalisé par des entreprises françaises. Seuls les États-Unis disposent à ce jour d'une installation comparable. Le Laser Mégajoule, par ses exigences de performances largement au-dessus des

standards industriels communs, est une formidable référence de classe mondiale pour les industriels qui y ont contribué.

L'implantation du Laser Mégajoule sur le centre CEA du Cesta a dynamisé la filière de l'optique en région Nouvelle-Aquitaine. Catalysée par un accompagnement durable de la part de la région, cette filière s'est développée avec force : un centre technologique, un pôle de compétitivité, des cursus de formation initiale et professionnelle spécifiques, des laboratoires de recherche académiques et privés, plusieurs dizaines de start-up et des milliers d'emplois locaux illustrent cette vigueur économique.

5. LES CATÉGORIES D'EXPÉRIENCES DE PHYSIQUE SUR LE LMJ

Le LMJ permet de valider les modèles fondamentaux (équations de physique) décrivant la physique du fonctionnement des armes nucléaires et de réaliser des expériences mettant en jeu l'enchaînement et l'imbrication de ces modèles. Ces expériences sont essentielles pour qualifier la « couverture » la plus complète possible du domaine de fonctionnement des armes par les logiciels de simulation numérique. La validation de la simulation repose sur de nombreuses catégories d'expériences :

- l'interaction laser-matière, où l'on étudie la conversion de lumière laser en rayonnement X ;

- le comportement de la matière soumise à des conditions extrêmes de température et de pression, pouvant atteindre plusieurs millions de degrés et plusieurs milliards de fois la pression atmosphérique ;

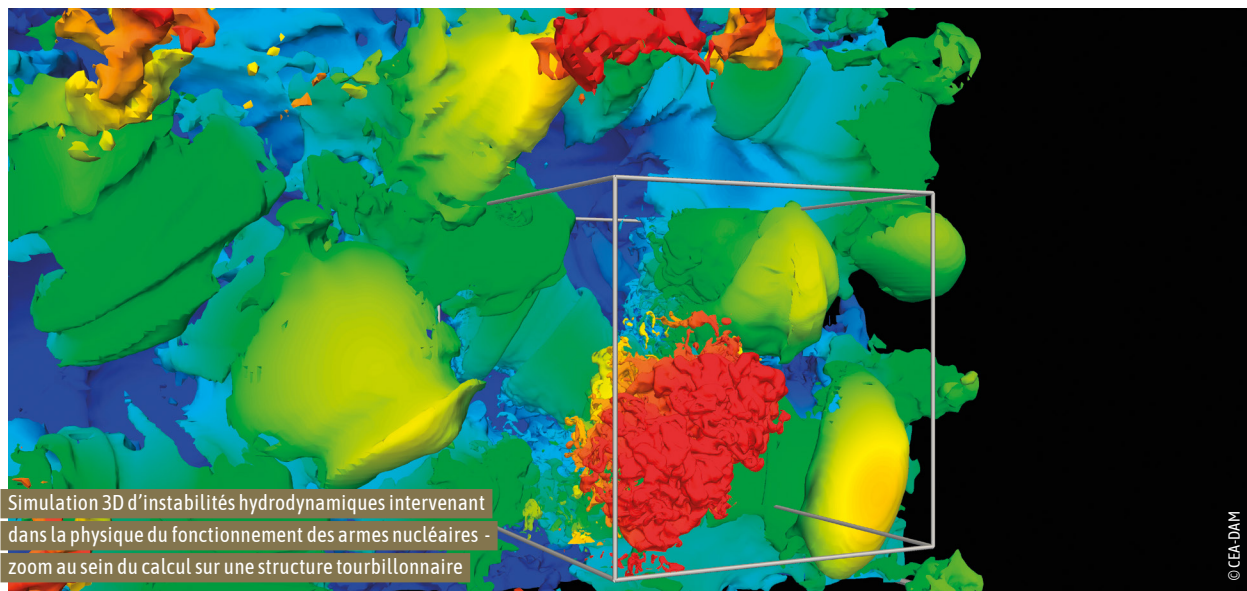
- l'interaction du rayonnement X avec la matière, pour étudier la propagation du rayonnement ou l'utiliser pour mettre en mouvement très rapide la matière ;

- l'implosion d'une cible mise en vitesse par un rayonnement X, non uniforme, pour démontrer la capacité des codes de simulation à restituer une dynamique complexe ;

- les instabilités hydrodynamiques et la turbulence (illustrées sur la simulation ci-dessous), phénomènes rencontrés dans la physique du fonctionnement des armes nucléaires ;
- les expériences de fusion thermonucléaire, pour examiner les conditions associées au fonctionnement des armes nucléaires ;
- les expériences de fusion, pour valider les couplages de modèles physiques dans les codes de simulation des armes nucléaires ;
- les expériences d'ignition, c'est à dire la fusion avec un gain (rapport de l'énergie de fusion à l'énergie laser), qui

constituent les expériences les plus complexes à réaliser en laboratoire.

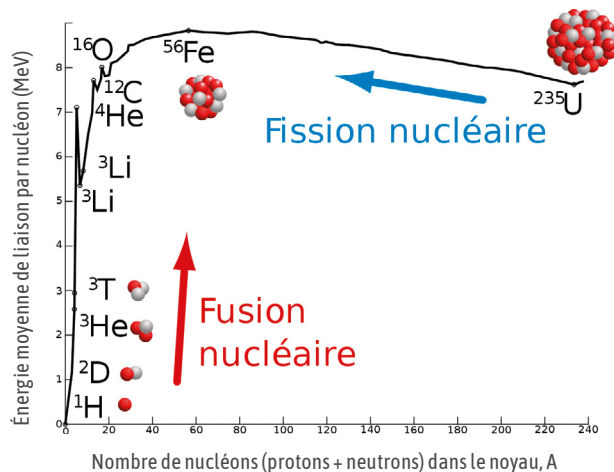
Depuis sa mise en service fin 2014, la montée en énergie du LMJ permet de réaliser des expériences de plus en plus représentatives et précises qui contribuent à valider la simulation du fonctionnement des armes. Ces expériences nécessitent des cibles de plus en plus complexes dont la fabrication relève d'une démarche de micro, voire nano-technologies, et de physico-chimie des matériaux, maîtrisée par la DAM. La réussite d'une expérience nécessite ainsi la maîtrise de trois domaines distincts : les faisceaux laser, les diagnostics (dispositifs de mesures) et les microcibles.



6. LA FUSION THERMONUCLÉAIRE

La courbe des masses nucléaires (figure ci-dessous) associée à la fameuse relation établie par Einstein – $E = mc^2$ – nous enseigne qu’il existe deux types de réactions nucléaires susceptibles de produire de l’énergie : la fission des atomes « lourds » et la fusion des atomes « légers ». La fission nucléaire correspond à la cassure de noyaux atomiques « lourds », c’est-à-dire composés d’un grand nombre de constituants, neutrons et protons. Cette cassure est provoquée par exemple par bombardement des atomes par un flux de neutrons, mécanisme mis à contribution dans les centrales nucléaires.

La fusion nucléaire, quant à elle, intéresse des noyaux atomiques « légers », en particulier deux isotopes de l’hydrogène, le deutérium et le tritium, et correspond lors de la collision entre ces deux noyaux à la production d’un élément plus lourd, l’hélium-4, et d’un neutron.



Dans une arme nucléaire, fission et fusion concourent également au dégagement d’énergie de la charge. La maîtrise des réactions de fusion est donc capitale pour la bonne modélisation du fonctionnement et des performances des armes.

Pour faire fusionner un noyau de deutérium et un noyau de tritium, il faut les rapprocher à très courte distance, et pour cela vaincre la répulsion électrostatique entre ces noyaux tous deux porteurs d’une charge électrique positive. La solution : chauffer la matière à une température telle que l’agitation thermique conduise à une probabilité élevée de collisions et de réactions de fusion entre ces noyaux. À une telle température – plusieurs dizaines de millions de degrés – la matière est ionisée et forme un plasma. Mais un milieu aussi chaud a tendance à se dissiper très rapidement ; pour qu’un nombre conséquent de réactions de fusion puisse s’y dérouler, il faut le confiner :

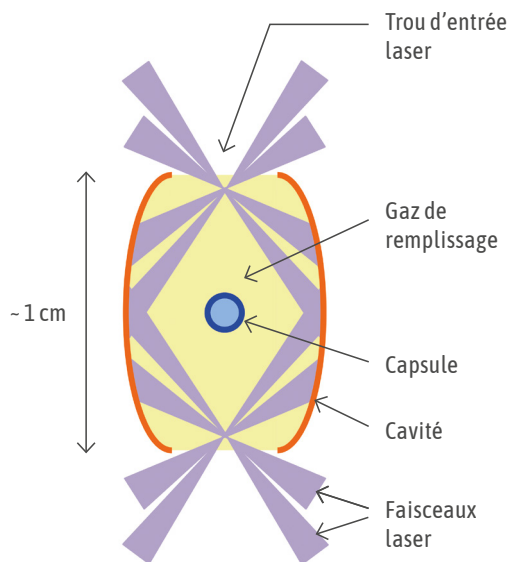
- soit par la force de gravité, comme dans les étoiles ;
- soit par un champ magnétique qui piège les particules, comme dans le tokamak ITER ;
- soit par l’inertie du milieu, en le comprimant à des densités telles que les réactions de fusion soient plus rapides que le déconfinement : c’est la voie suivie dans les armes nucléaires et les expériences laser.

En plus de la réaction de fusion entre deutérium et tritium, d’autres réactions existent, telle la fusion entre deux ions deutérium. Cette réaction produit environ cent fois moins de neutrons, mais elle présente l’avantage de ne pas mettre en jeu de produits radioactifs, comme l’est le tritium, ce qui simplifie la réalisation de l’expérience. C’est donc cette fusion deutérium-deutérium qui a été réalisée dans les premières expériences au LMJ.

7. LA FUSION PAR CONFINEMENT INERTIEL

Produire un grand nombre de réactions de fusion nucléaire demande de porter à haute température – plusieurs dizaines de millions de degrés – et haute pression – plusieurs centaines de milliards d’atmosphères – une petite quantité de deutérium et de tritium (DT) qui sont les deux isotopes fusibles de l’hydrogène.

Pour atteindre de telles conditions avec une installation laser, une approche consiste à disposer ces isotopes au centre d’une capsule sphérique en plastique de quelques millimètres de diamètre, elle-même placée au centre d’une petite cavité en or de longueur centimétrique.

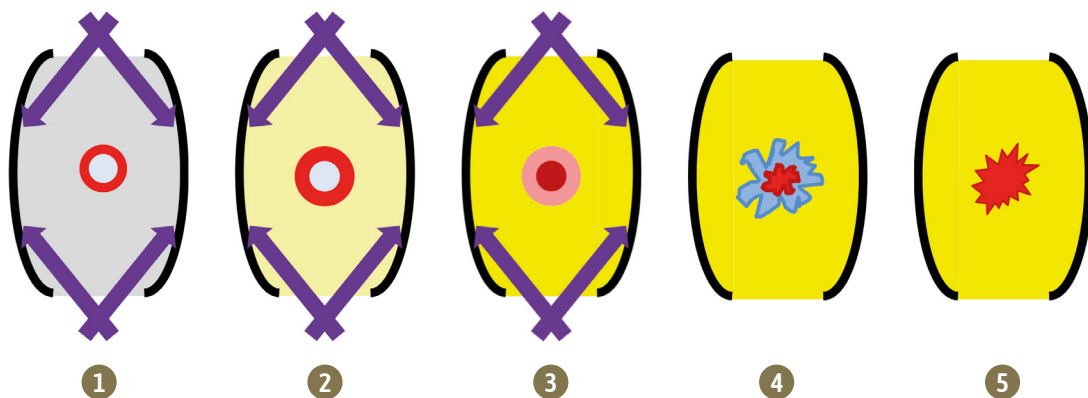


Une autre approche possible pour imploser la capsule sphérique contenant le DT consiste à l'éclairer directement avec les faisceaux laser. Cependant l'implosion en cavité, plus proche du fonctionnement des armes, est le schéma prioritaire étudié par la DAM.

Dans certaines expériences la cavité est elle-même remplie d'un gaz ; dans le cas des expériences de fusion de 2019 sur LMJ, ce gaz n'était pas nécessaire.

Les faisceaux laser sont dirigés vers la paroi interne de cette cavité via deux trous d'entrée laser ❶ ; à leurs points d'impacts, un plasma est créé, absorbant l'énergie des faisceaux laser et réémettant la majeure partie de cette énergie sous forme de rayonnement X. C'est la raison pour laquelle on désigne cette cible par l'appellation « cavité de conversion X ».

La cavité se remplit d'un rayonnement X intense ❷ ; la paroi de la capsule placée en son centre, qui contient le mélange fusible, est vaporisée par ce rayonnement (on parle d'« ablation » des couches externes de la capsule). La détente de la paroi de cette capsule, par réaction, entraîne une implosion de ses couches internes ❸ : le mélange fusible est comprimé à grande vitesse.



Au cours de cette compression, des instabilités peuvent se produire ④ : ces instabilités résultent de l'amplification des micro-imperfections de surface initiales de la capsule par l'accélération brutale qu'elle subit ; elles résultent également de l'amplification des inhomogénéités d'accélération de la capsule liées aux non-uniformités de rayonnement X tout autour de celle-ci. Il faut que ces instabilités soient maintenues à un niveau faible par des choix de conception et des spécifications de fabrication des cibles, pour ne pas mettre en péril l'atteinte des conditions de démarrage des réactions de fusion.

Dans ce cas, les réactions de fusion s'amorcent au centre de la cible à la fin de son implosion et se propagent au combustible DT environnant ⑤.

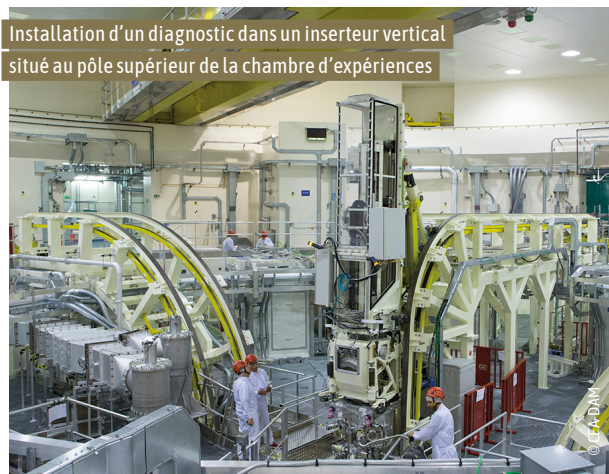
8. LES DISPOSITIFS DE MESURE

Un premier dispositif de mesure (on dit aussi « diagnostic ») était opérationnel sur le LMJ en 2014, lors de sa mise en service, pour caractériser les premières expériences.

Depuis fin 2019, ce sont 14 diagnostics différents qui peuvent être pointés au centre de la chambre d'expériences pour caractériser le plasma créé par interaction des faisceaux laser avec la cible.

Chacun de ces diagnostics réalise une mesure spécifique :

- l'imagerie du plasma, depuis le rayonnement visible jusqu'aux rayons X, intégrée ou résolue en temps ;
- la mesure spectrale du rayonnement émis par le plasma ;
- la mesure de vitesse de la cible par réflexion d'un faisceau-sonde sur sa surface ;
- la mesure des neutrons émis dans plusieurs directions autour de la cible ;
- le bilan de l'énergie laser réfléchi par la cible.



Installation d'un diagnostic dans un inserteur vertical
situé au pôle supérieur de la chambre d'expériences

Certains diagnostics sont fixes dans la chambre d'expériences. D'autres sont placés dans des systèmes d'insertion qui les approchent du lieu de l'expérience, pour bénéficier d'un signal plus intense ou d'une mesure plus précise.

Durant chaque expérience de la campagne de fusion de 2019, un imageur X a réalisé une douzaine de clichés du plasma visible par le trou d'entrée laser supérieur de la cavité, sur une durée d'expérience de quelques milliardièmes de seconde.

Chacune de ces images est produite par un système optique différent et enregistrée par une caméra à image intégrale X avec une résolution spatiale de l'ordre de 30 millièmes de millimètre et un temps de pose de 100 picosecondes, soit un dix-milliardième de seconde. Cet imageur est positionné dans la chambre d'expériences pour viser la cible avec une précision de l'ordre de 100 millièmes de millimètre.

Les neutrons produits par les réactions de fusion dans la cible ont été détectés par six voies de mesure observant la cible selon des directions différentes. Chaque voie de mesure associe un blindage, un photomultiplicateur sensible aux neutrons et un système de polarisation pour piloter l'instant d'acquisition du signal. L'ensemble est approché à environ 3,5 mètres du lieu de l'expérience, à l'intérieur de tubes fixés sur la paroi de la chambre d'expériences. Chaque détecteur mesure un nombre de neutrons et une durée de détection du signal neutronique. Cette dernière mesure, liée à la vitesse avec laquelle les neutrons sont émis par la cible, permet de remonter à la température du plasma, siège des réactions de fusion.

La mise en œuvre de mesures complémentaires sur chaque expérience permet de réaliser des comparaisons plus exigeantes avec les simulations numériques et, ainsi, de faire progresser plus rapidement les modèles physiques.

9. LES MICROCIBLES DES EXPÉRIENCES DE FUSION

Les cibles de fusion prennent la forme d'une cavité en or (servant à la conversion du laser en rayonnement X), d'environ 8 millimètres de long, au centre de laquelle est positionnée une petite bille de plastique remplie de deutérium gazeux, à une pression de plusieurs dizaines d'atmosphères. Ces différents éléments doivent être assemblés avec un soin extrême et positionnés dans la chambre d'expériences avec une précision meilleure que 100 millièmes de millimètre.

Les cavités de conversion sont fabriquées en usinant, avec une machine d'ultra-précision, la forme interne de la cavité dans un massif d'aluminium. Sur cette forme, un dépôt électrolytique d'or ultra-pur est réalisé sur une épaisseur de quelques dizaines de millièmes de millimètre. La forme extérieure de la cavité est ensuite usinée, puis enrobée dans un matériau structurant, avant de dissoudre l'aluminium.

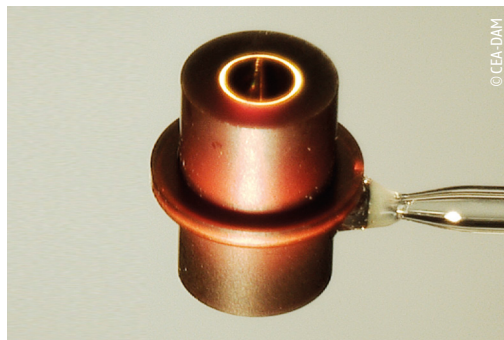
Les billes de plastique – qui font quelques millimètres de diamètre pour une épaisseur de quelques dizaines de millièmes de millimètre – sont fabriquées avec un principe analogue : on fabrique d'abord un ballon plein, substrat sur lequel on réalise un dépôt de polymère, puis on évapore le ballon substrat pour ne garder que la coquille de polymère.

Cette coquille de polymère est ensuite placée au centre d'une cavité de conversion, soutenue par deux feuilles de plastique extrêmement minces (moins d'un millième de millimètre d'épaisseur). La cible est alors montée sur un mât porte-cible muni de quelques repères géométriques qui permettront son alignement au centre de la chambre d'expériences.

À ce stade, les billes de plastique n'ont toujours pas été remplies de deutérium. Ce remplissage constitue la dernière étape de fabrication de la cible : il est réalisé par diffusion à

travers l'épaisseur de la bille de polymère, en plaçant toute la cible dans une enceinte remplie de deutérium à haute pression, jusqu'à atteindre les dizaines d'atmosphères souhaitées.

Quelques heures avant l'expérience, la cible est sortie de son enceinte pressurisée, placée sur le porte-cible dans la chambre d'expériences et alignée avec la même précision que les faisceaux laser.

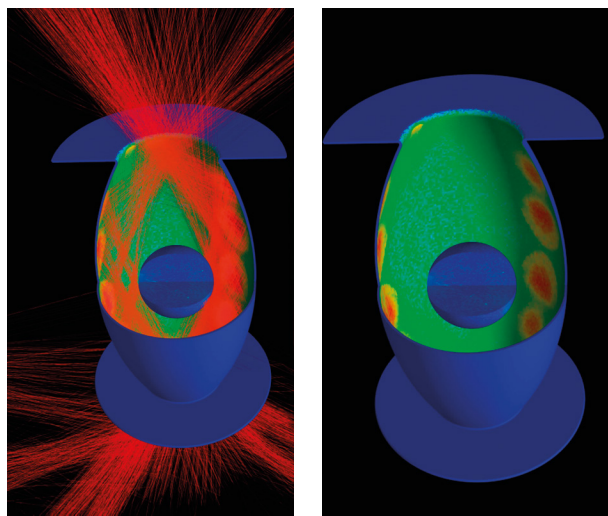


Vues extérieures de la cible de fusion.

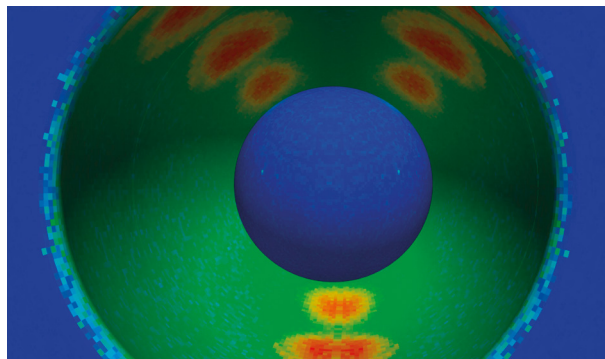
Sur le cliché du bas, on voit la bille de polymère, remplie de deutérium, placée au centre de la cavité de conversion

10. LA PREMIÈRE EXPÉRIENCE DE FUSION EN 2019

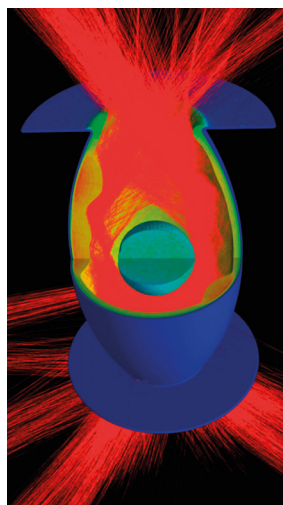
En octobre 2019, 48 faisceaux laser ont été mis en œuvre simultanément pendant 3 milliardièmes de seconde sur une microcible pour réussir la première expérience de fusion nucléaire au Laser Mégajoule. Cette microcible était composée d'une cavité en or contenant une bille remplie de deutérium. Cette expérience a été dimensionnée par un calcul de prévision en trois dimensions (3D).



La cavité est disposée verticalement dans la chambre d'expériences et 24 faisceaux laser sont dirigés vers chacun des trous de la cavité, haut et bas. Le laser chauffe les parois en or qui se détendent en émettant un rayonnement X. En absorbant ce rayonnement, les couches externes de la bille chauffent et se détendent à leur tour, ce qui entraîne la compression brutale du deutérium par contre-réaction (c'est l'effet fusée).



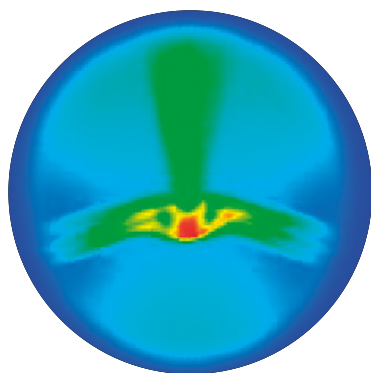
Dans cette configuration à 48 faisceaux, l'éclairement en rayonnement X n'est pas uniforme autour de la bille : les impacts des faisceaux laser se distinguent nettement sur les parois de la cavité, à trois angles autour de son axe.



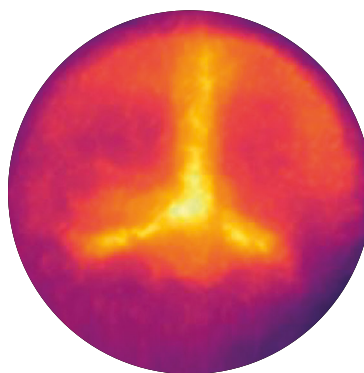
Comme le rayonnement que reçoit la bille n'est pas uniforme, certaines zones sont plus chauffées que d'autres et la compression du deutérium n'est pas sphérique. C'est la raison pour laquelle une modélisation en 3D de l'expérience était nécessaire. Ce calcul 3D indique que, malgré sa déformation, le deutérium contenu dans la bille chauffe et se comprime suffisamment pour atteindre les conditions de la fusion.

Au démarrage des réactions de fusion, dans l'expérience, une image axiale de la cible a été réalisée en captant le rayonnement X qu'elle émet par son trou d'entrée laser supérieur. La même image est simulée à partir du rayonnement X émis par la cible dans le calcul. **Les images obtenues sont très similaires.**

À l'issue de la phase de fusion nucléaire du deutérium, le nombre de neutrons mesurés dans l'expérience s'élève à quelques centaines de milliards. Ce nombre est conforme au calcul de prévision.



Imagerie X simulée



Imagerie X expérimentale

La réussite de cette expérience complexe repose sur la qualité des outils de simulation 3D et la performance de l'installation Laser Mégajoule, mais aussi sur la compétence des physiciens, ingénieurs et techniciens qui les mettent en œuvre. Elle marque le franchissement d'un jalon majeur du programme Simulation pour la garantie des armes nucléaires françaises.

11. LES OBJECTIFS SCIENTIFIQUES

DE LA CAMPAGNE EXPÉRIMENTALE DE FUSION

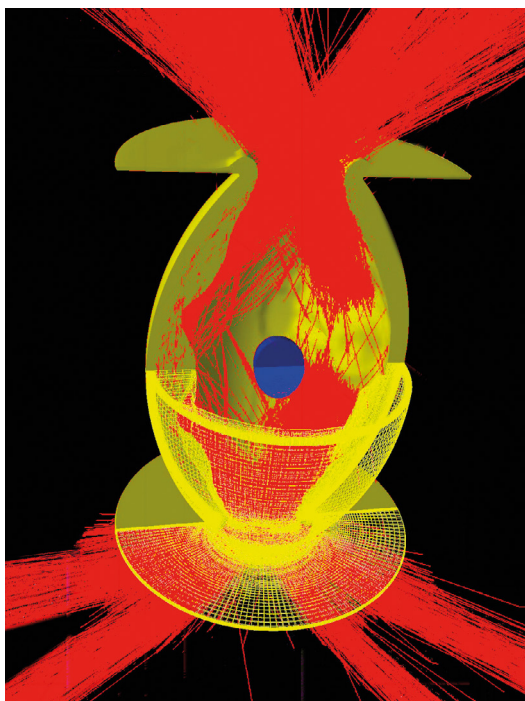
Pour réussir une expérience de fusion nucléaire, il faut que les modèles utilisés dans le calcul de prévision décrivent fidèlement l'ensemble des phénomènes physiques mis en jeu dans l'expérience. Cela est d'autant plus difficile lorsque l'expérience s'éloigne d'une configuration bidimensionnelle, car la description des phénomènes en trois dimensions, plus complexe, est d'autant plus cruciale à maîtriser. Pour tester ces modèles, apprécier leur précision et proposer des améliorations, il est intéressant de faire varier les conditions initiales de l'expérience et de mesurer l'impact de ces variations sur la production de neutrons.

Ainsi, en faisant varier l'épaisseur de la bille contenant le deutérium, il est possible de jouer sur la production de neutrons. Une bille peu épaisse sera rapidement ablatée et n'exercera sa poussée sur le deutérium que pendant un temps limité. Une bille plus épaisse, en revanche, sera ablatée pendant toute la durée de son implosion et maximisera donc la poussée et la compression sur le fusible. Si l'implosion de la bille était parfaitement sphérique, la production de neutrons serait donc plus forte pour une bille plus épaisse. Mais l'implosion est perturbée par la

non-uniformité du rayonnement X, résultant de la non-uniformité de l'éclairement laser. Si l'implosion est plus longue, les perturbations ont le temps de s'amplifier jusqu'à percer le confinement du deutérium ou bien à « polluer » le deutérium en le mélangeant avec le plastique qui compose la capsule. Dans les deux cas, les conditions du démarrage des réactions de fusion ne sont plus atteintes et la production de neutrons tend à diminuer.

Les influences sur la production de neutrons de fusion de l'épaisseur de la bille mais aussi de son diamètre et des conditions plus ou moins uniformes d'éclairement laser ont ainsi été testées lors d'une campagne d'une dizaine d'expériences.

La comparaison très favorable des résultats de calculs avec des mesures de nature différente (nombre de neutrons, images X, spectre du rayonnement émis par la cavité...) faites à des instants différents, constitue une validation convaincante des capacités de calcul 3D, pour cette première campagne expérimentale. Ainsi, sur trois expériences réalisées pour des épaisseurs croissantes de bille, le nombre de réactions croît



fortement quand on passe de la bille la plus fine à celle d'épaisseur intermédiaire. Puis, pour la bille la plus épaisse, ce nombre commence à diminuer, signant la dégradation de l'implosion due à l'amplification des perturbations résultant de la non-uniformité du rayonnement X.

Simulation et expérience sont en bon accord sur ces tendances mais des écarts subsistent. L'ensemble des résultats obtenus vont maintenant concentrer l'analyse des équipes de la DAM, afin d'établir des modèles encore plus précis de l'expérience, capables de corriger ces écarts.

Parmi les phénomènes physiques susceptibles d'être mieux modélisés à l'avenir, figurent par exemple le bilan de l'énergie laser dans la cavité (fraction de l'énergie incidente qui est effectivement absorbée par la cavité de conversion, et fraction qui fuit par les trous de la cavité) et la chronométrie d'implosion de la cible (variations de sa vitesse au cours du temps).

Ces modèles améliorés, validés sur l'analyse de cette campagne d'expérience, pourront ensuite être confrontés à des expériences à plus haute énergie laser, poursuivant cette itération entre expérience et modélisation qui est à la base de toute méthode scientifique.



Retrouvez la première expérience de fusion nucléaire
au Laser Mégajoule, réalisée en octobre 2019, sur
www-dam.cea.fr