

La fusion par confinement inertiel est une voie de recherche explorée pour obtenir la fusion des éléments légers, parallèlement à la fusion par confinement magnétique. Alors que, dans cette dernière, le confinement maintient le plasma à une très faible densité (10^{-5} fois la densité de l'air) pendant des temps de l'ordre de la seconde, la méthode "inertielle" consiste à réaliser des densités beaucoup plus fortes (10^6 fois la densité de l'air) maintenues pendant des temps déterminés par l'inertie du système (typiquement quelques dizaines de picosecondes). Les lasers permettent une très grande concentration de l'énergie dans les temps nécessaires à la fusion par confinement inertiel. Ainsi, le laser Mégajoule (LMJ), construit par le CEA pour les applications de Défense, doit permettre de réaliser l'allumage et la combustion par confinement inertiel au début de la prochaine décennie. Les conditions de température et de pression qu'il permettra d'atteindre rendront aussi possible l'étude des phénomènes thermonucléaires dans les plasmas de type stellaire.

La fusion par confinement inertiel

Les principes de base : compression et brièveté

Le processus de la fusion par confinement inertiel peut être comparé à celui d'un moteur Diesel : la compression du mélange – amené à une densité 1 000 fois supérieure à celle de l'état liquide – conduit à l'allumage et à l'explosion, dans des temps inférieurs à la centaine de picosecondes.

Quelle que soit la technique employée, la problématique de la **fusion** nucléaire reste la même : vaincre la répulsion des **noyaux** de deux **éléments légers** afin qu'ils mettent en commun leurs **nucléons** pour constituer un élément plus lourd. La réaction de fusion

nucléaire la moins difficile à réaliser est celle qui peut intervenir entre le **deutérium** (D) et le **tritium** (T), deux **isotopes** de l'**hydrogène**. Elle donne naissance à un noyau d'**hélium 4** (**particule alpha**) doué d'une énergie de 3,52 MeV et à un **neutron** de 14,06 MeV.

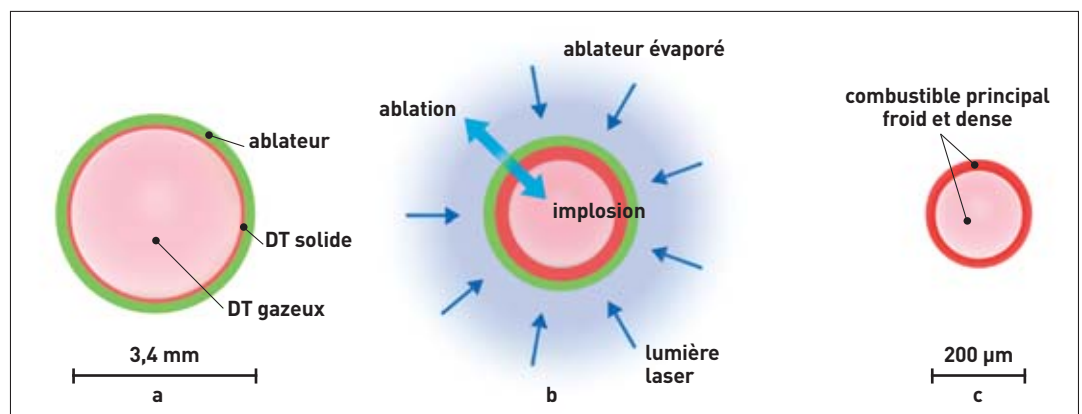
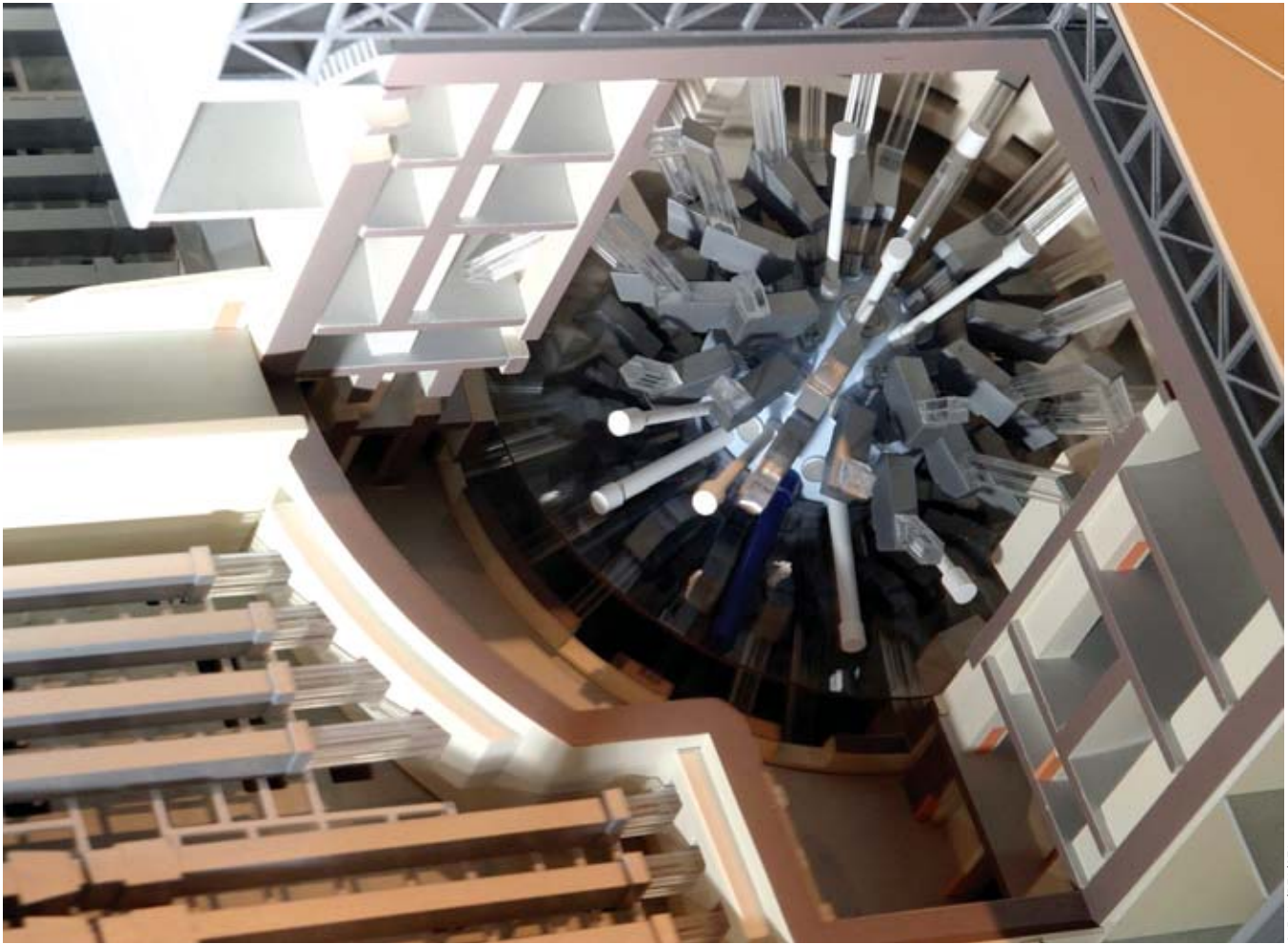


Figure 1.

Dans son état initial (a), la cible conçue pour l'ignition sur le LMJ est constituée d'une coquille de glace de DT, à la température de 17 K, entourée d'un ablateur, plastique ou DT solide. La tension de vapeur saturante de DT remplit la partie centrale. Lorsqu'elle est éclairée par le laser (b), la matière chauffée est éjectée par ablation, ce qui induit, par contre-réaction, une poussée qui comprime la cible.

Au moment de l'allumage, le rayon de la cible est le quinzième de son rayon initial (c). L'ablateur s'est évaporé et l'essentiel de la masse du combustible est contenu dans une coquille très dense (200 à 500 g/cm³). Les réactions thermonucléaires se déclenchent en premier lieu dans la partie centrale, moins dense mais très chaude (environ 100 millions de degrés).



G. Rollet/REA/CEA

Maquette du laser Mégajoule en cours de construction par le CEA au Centre d'études scientifiques et techniques d'Aquitaine, au Barp près de Bordeaux. À gauche, une partie des chaînes laser. À droite, la chambre d'expérience (en bleu) où convergent l'ensemble des lignes laser et de nombreux équipements de diagnostic (en blanc).

L'énergie considérable qui doit être donnée aux deux noyaux de deutérium et de tritium sous forme de vitesse relative est fournie par l'agitation thermique. La probabilité maximale d'occurrence de la réaction de fusion dans un **plasma** de DT se situe vers **70 keV**. Elle atteint un dixième de cette valeur vers 10 keV.

Un critère classique pour la fusion d'un plasma est le *critère de Lawson*: il consiste à assurer que l'énergie de fusion dégagée (*modulo* un rendement d'extraction de 30%) soit supérieure à l'énergie qu'il faut fournir au plasma pour l'amener dans les conditions de combustion. Or l'énergie de fusion dégagée par unité de volume dépend de trois paramètres: la température, la densité (le nombre n d'**ions** par unité de volume) et le temps τ pendant lequel ces deux conditions sont maintenues. Si l'on considère que les réactions de fusion se produisent efficacement à partir de 10 keV, le critère de Lawson pour un plasma de DT s'écrit: $n \cdot \tau > 2 \cdot 10^{14}$ (s·cm⁻³).

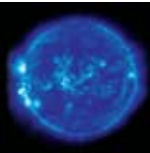
La fusion par confinement magnétique réalise ce critère en maintenant des densités supérieures à 10¹⁴ ions par cm³ pendant des temps sensiblement supérieurs à la seconde. Dans la fusion par **confinement inertiel**, la démarche est complètement différente: on comprime très fortement le plasma jusqu'à des densités de 10²⁶ ions par cm³ (soit 300 g/cm³!) mais celles-ci ne sont maintenues que pendant une durée très brève (quelques 10⁻¹¹ s) avant que le plasma ne se détende (explosion). Afin de brûler une fraction suffisante du **combusti-**

ble, il faut que le phénomène de fusion soit plus rapide que sa détente sous l'effet de sa pression interne. Cette condition est satisfaite si le combustible est suffisamment chaud et dense ou, plus précisément, concentré (c'est le produit ρR de la masse volumique par le rayon de la sphère qui caractérise cette propriété). Dans le cas d'une microcible sphérique contenant un mélange de deutérium et de tritium (DT) à la température de 40 keV, par exemple, il sera possible de brûler un tiers du combustible dès que le produit ρR excédera 3 g/cm². Pour une masse M de DT, ce critère s'écrit aussi:

$$\rho_{(g/cc)} \geq \frac{10}{\sqrt{M_{(g)}}} :$$

plus la masse à brûler est faible, plus la densité requise, et donc la compression du mélange, est élevée.

Prenant en compte le rendement massique de la fusion du DT (340 MJ/mg), il sera par exemple possible d'obtenir 100 MJ à partir de 1 mg de DT si la densité du mélange atteint environ 300 g/cm³ (soit plus de mille fois la densité du solide) et sa température 40 keV. Le rayon de la sphère sera alors de cent **micromètres** et le temps imparti à la combustion (*temps de confinement*) d'environ 25 **picosecondes**. Ces conditions expérimentales peuvent théoriquement être atteintes en implosant une coquille sphérique de combustible solide **cryogénique** (figure 1) à l'aide d'un **laser** délivrant une énergie de 1 à 2 mégajoules (MJ). Pour obtenir ce résultat, un certain nombre de paramètres



doivent être maîtrisés, comme cela va être décrit en considérant toujours le même exemple d'un mélange de 1 mg de DT contenu dans une microcible.

Allumage par point chaud

Il faut tout d'abord minimiser l'énergie déposée par le laser dans le mélange de DT. La compression demande relativement peu d'énergie: environ 15 à 40 kJ par mg, si elle est conduite de façon efficace. En revanche, atteindre la *température* requise pour initier la combustion nécessiterait une énergie beaucoup plus élevée: 1,1 MJ par mg. Afin de diminuer cette contrainte, seule une faible partie de la masse du combustible (10 à 20 µg) est portée à la température d'allumage. Cette "étincelle" à haute température appelée *point chaud*, confinée par le reste du combustible très dense qui l'entoure, pourra initier une combustion auto-entretenu, à condition de "recapturer" une fraction sensible de l'énergie de fusion dégagée, essentiellement celle véhiculée par les particules alpha émises.

Compression du combustible

Dans ces conditions, l'énergie totale de compression et de chauffage du point chaud s'élève à environ 60 kJ. Cette énergie doit être communiquée au combustible en premier lieu sous forme d'énergie cinétique: la vitesse nécessaire d'implosion, de l'ordre de 400 km/s, nécessite une pression voisine de 100 **mégabars** (Mbar), soit $10 \cdot 10^{12}$ pascals. Cette pression et cette vitesse peuvent être obtenues avec un laser de puissance et une cible adéquate faite d'une coquille composée d'une couche externe en plastique et d'une couche interne en DT sous forme de glace (voir *Les microcibles cryogéniques, éléments clés des expériences de confinement inertiel sur le LMJ*). Lorsqu'un faisceau laser intense interagit avec une cible, un plasma est en effet formé sur sa surface par **ablation**, puis éjecté vers l'extérieur à grande vitesse. Par contre-réaction, une quantité de mouvement centripète (si la cible est sphérique) est transférée à la partie encore froide, processus que l'on peut appeler, par analogie, *effet fusée*. La pression engendrée est maximale au voisinage du front d'ablation. Elle est liée à

l'intensité du laser et à sa longueur d'onde par la loi d'échelle: $P_{\text{Mbar}} = 40 (I_{\text{PW/cm}^2} / \lambda_{\mu\text{m}})^{2/3}$. Cette loi indique que les courtes longueurs d'onde sont plus efficaces, à éclairage donné, pour induire de fortes pressions: une pression de 100 mégabars peut être obtenue avec un laser d'intensité voisine de 10^{15} W/cm² pour une longueur d'onde de 0,35 micromètre.

L'énergie laser nécessaire dépend du rendement hydrodynamique de l'implosion induite par l'ablation. Un rendement de 5% conduit, dans cet exemple, à une énergie de 1,2 MJ. Une mise en forme temporelle adéquate de l'impulsion laser peut permettre d'optimiser le processus de compression (figure 2). D'autres paramètres doivent dans le même temps être optimisés, en premier lieu la symétrie d'éclairage du microballon contenant le mélange de DT.

Une symétrie d'éclairage parfaite

L'exemple précédent suppose en effet une symétrie sphérique parfaite de l'échantillon et de son éclairage, car tout écart à la sphéricité diminuerait l'efficacité de la compression jusqu'à empêcher le point chaud d'apparaître.

Le laser utilisé devra donc comporter un grand nombre de faisceaux pour assurer la meilleure symétrie d'éclairage possible. En réalité, des erreurs de pointage, de positionnement de l'échantillon et d'équilibrage d'éclairage sont inévitables. Des spécifications techniques rigoureuses, comme une incertitude de pointage inférieure à 50 micromètres, ont été établies par les spécialistes du CEA afin de maintenir la non-uniformité d'éclairage en dessous de 1%, ce qui permet de réunir les conditions propres à l'**ignition**.

Combattre les instabilités hydrodynamiques

D'autres processus peuvent aussi empêcher d'obtenir les conditions de fusion: les instabilités hydrodynamiques. L'implosion ablative décrite plus haut consiste à accélérer un milieu dense par un milieu moins dense (figure 3). Cette situation est analogue à celle d'un fluide lourd surmontant un fluide léger dans un champ de pesanteur. Cette configuration est par constitution instable (instabilité de Rayleigh-Taylor) et toute perturbation de l'écoulement, relativement à la forme sphérique idéale, est amplifiée au cours du temps. La croissance est d'abord exponentielle, puis, dès que l'amplitude du défaut devient comparable à sa longueur d'onde, une saturation non linéaire de la croissance apparaît. Il faut, enfin, signaler que le phénomène d'ablation, qui est à l'origine du mouvement, tend à en tempérer le caractère instable.

Les perturbations initiales sont dues à la rugosité des interfaces entre milieux et aux non-uniformités d'éclairage. Pour les minimiser, les cibles devront avoir des rugosités externes moyennes de 50 **nanomètres** et des rugosités internes (glace de DT) de 1 micromètre.

Les instabilités de l'interaction laser-plasma

D'autres types d'instabilité peuvent également perturber les expériences de fusion. Ce sont les instabilités liées à l'interaction laser-plasma. En effet, comme on l'a vu, dès le début de l'éclairage, un plasma est créé par ablation. Durant toute la durée de l'éclairage ce plasma va interagir avec l'onde laser et pourra ainsi l'absorber. Pour des intensités laser modérées, le taux

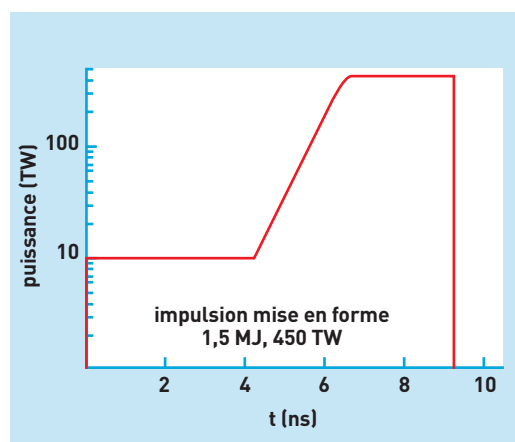


Figure 2. Lors de la compression du combustible, la loi de pression est obtenue au moyen d'une mise en forme temporelle de la puissance laser. Un palier initial de 10 térawatts en 4 nanosecondes (ns) crée un premier choc de 8 mégabars. Il est suivi d'une rampe douce qui amène à l'impulsion principale de 9,2 ns. On interrompt le laser et la coquille poursuit son vol jusqu'à la compression finale, obtenue vers 10 ns.

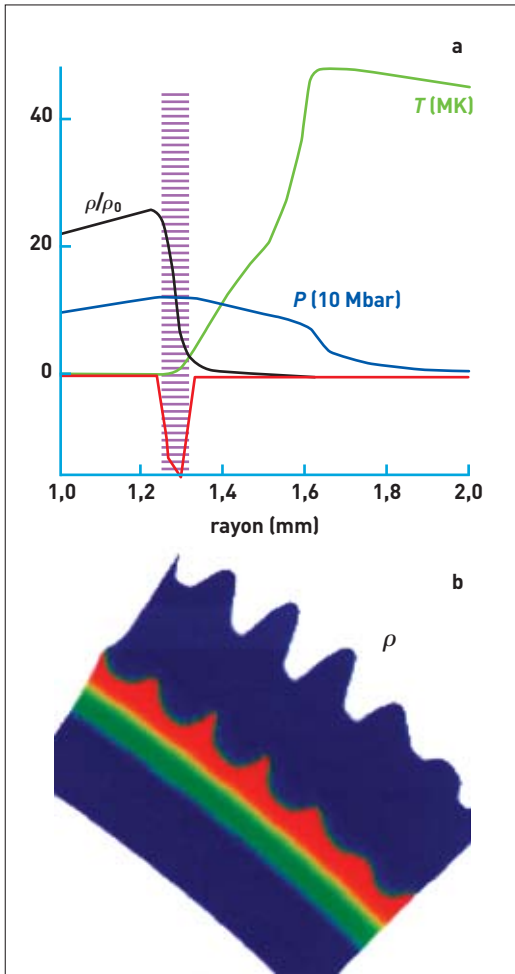


Figure 3. En a), état thermodynamique du front d'ablation au moment de l'accélération de la coquille. Dans la zone hachurée, le produit des gradients de densité ρ et de pression P est négatif (ligne rouge) : cette zone est soumise à l'instabilité de Rayleigh-Taylor. En b), représentation de la modulation de densité obtenue dans une simulation numérique d'implosion où on prend en compte l'empreinte laser. On peut observer le développement non linéaire de l'instabilité.

d'absorption varie de 60 % jusqu'à l'absorption totale, selon le matériau irradié. Aux fortes intensités (au-delà de 10^{15} W/cm^2 pour une longueur d'onde de $0,35 \mu\text{m}$), des instabilités plasma peuvent apparaître. L'instabilité de *filamentation pondéromotrice*, par exemple, est déclenchée par la combinaison de surintensités (spatiales ou temporelles) de l'éclairement et de fluctuations locales de l'indice de réfraction du plasma. Elle conduit à une auto-focalisation de l'onde laser : la lumière se concentre en minces filaments préjudiciables à une uniformité d'éclairement. De plus, le plasma, milieu compressible et conducteur, est le support d'ondes acoustiques ioniques et d'ondes électroniques. Sous certaines conditions, ces ondes peuvent échanger de l'énergie avec l'onde laser et se coupler de façon résonnante. Il en résulte une rétrodiffusion d'une partie de l'énergie laser (ce sont les *rétrodiffusions stimulées Brillouin et Raman*) ainsi qu'une production d'**électrons** de haute énergie susceptibles de chauffer le combustible avant sa compression. Ces processus d'instabilité sont préjudiciables à l'absorption de l'énergie laser par la cible, aussi de nombreux travaux théoriques et expérimentaux y

sont-ils consacrés. Ces travaux ont conduit à la conception de cibles robustes vis-à-vis de l'apparition de ces instabilités, ainsi qu'au développement de techniques propres à éviter l'apparition de surintensités laser (*lissage*).

Attaque directe ou indirecte ?

Dans la description précédente, on a considéré l'interaction directe entre l'onde laser et le microballon contenant le combustible DT : il s'agit du schéma dit *d'attaque directe* (figure 4a). Un autre schéma existe, qui présente plusieurs avantages mais aussi quelques inconvénients : c'est le schéma dit *d'attaque indirecte* (figure 4b). Il consiste à diriger les faisceaux lasers sur les parois internes d'une enceinte en or (la *cavité*) afin d'y produire du **rayonnement X**. Au centre de l'enceinte est disposé le microballon contenant le combustible de DT. Le rayonnement X créé est confiné dans la cavité comme dans un four et se trouve finalement proche d'un rayonnement de corps noir à une température de l'ordre de 300 eV (ou 3,5 millions de **kelvins**). Il est capable, au même titre que le rayonnement direct du laser, de produire l'implosion ablatif d'un microballon sphérique avec, cette fois, une meilleure uniformité d'éclairement et un rendement hydrodynamique accru. Il induit aussi une vitesse d'ablation plus élevée, ce qui réduit sensiblement la croissance des instabilités hydrodynamiques. Les physiciens de la Direction des applications militaires du CEA considèrent ce schéma comme le chemin le plus sûr pour obtenir la fusion thermonucléaire avec des gains supérieurs à l'unité. S'il est bien adapté à une utilisation expérimentale, en particulier dans le cadre du programme Simulation, son faible rendement (en termes d'énergie transmise au combustible) le rend peu approprié à une future

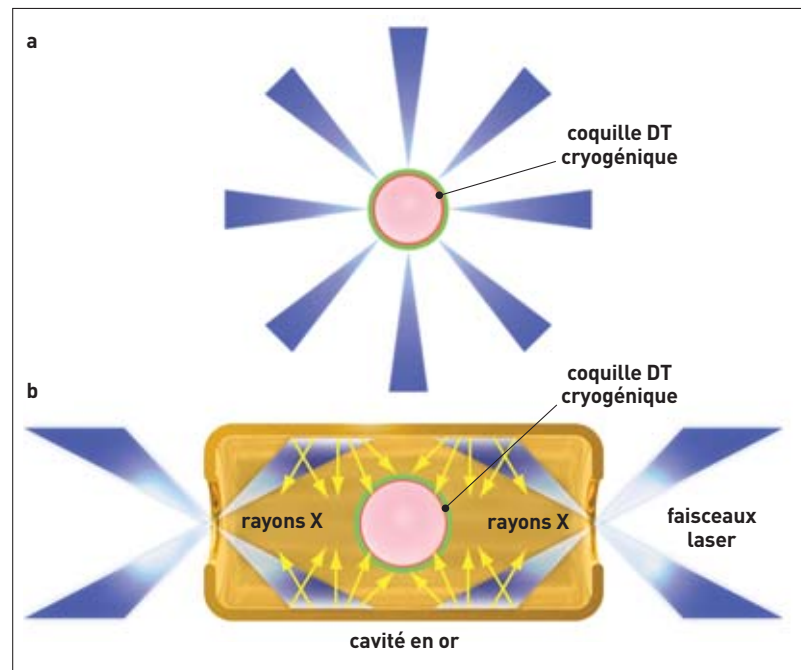
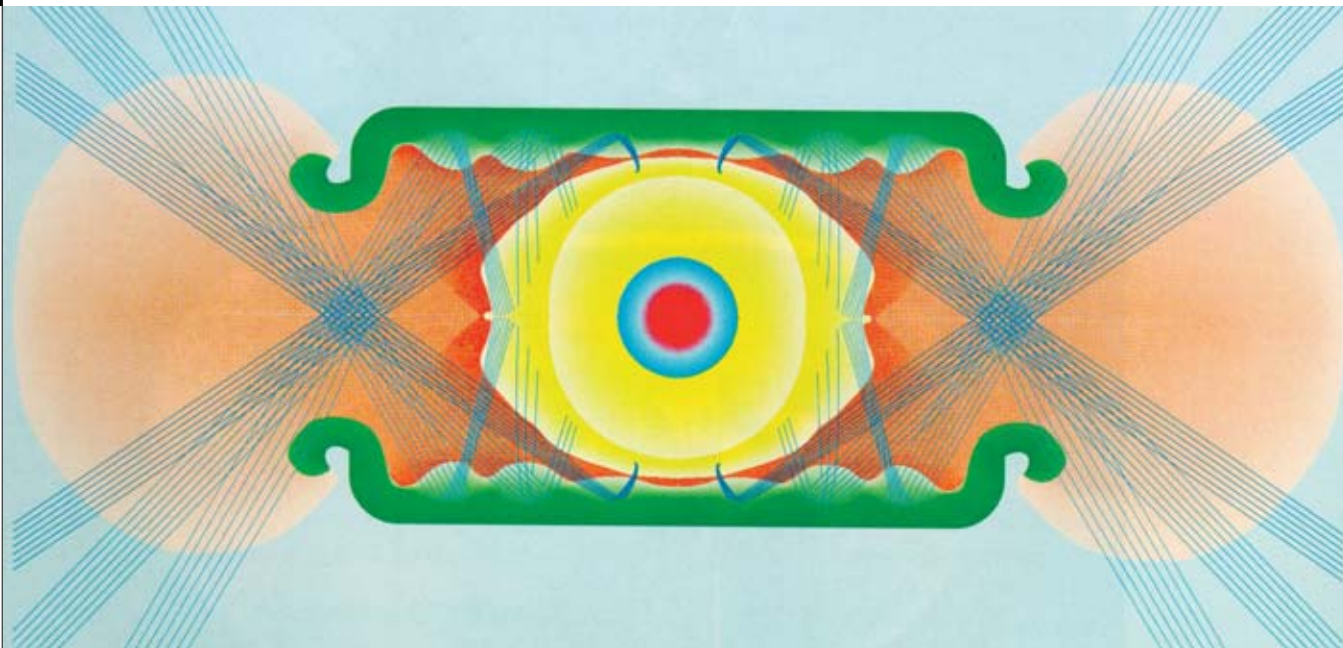
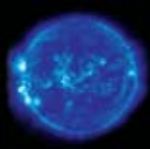


Figure 4. Schémas d'attaque directe (a) et indirecte (b). Dans le premier cas, les faisceaux laser interagissent directement avec la cible. Dans le second, ils interagissent avec les parois de la cavité cylindrique contenant le microballon. Les parois émettent un rayonnement X (en jaune) qui interagit à son tour avec ce microballon.



[reprise graphique F. Thais]

Figure 5. Simulation de l'implosion d'un microballon dans une cavité d'attaque indirecte décrite par un maillage lagrangien bidimensionnel (fin d'implosion). Ce type de simulation a permis de reproduire des expériences de symétrie d'irradiation en cavité.

production d'énergie à partir de laser. Il pourrait devenir compétitif avec d'autres générateurs comme les faisceaux d'ions lourds.

Les acquis de l'expérience et de la simulation

La fusion par confinement inertiel par laser bénéficie maintenant, en particulier depuis une dizaine d'années, d'un acquis expérimental très important. L'attaque directe a surtout été étudiée aux États-Unis à l'Université de Rochester, qui possède actuellement le laser Omega (60 faisceaux pour 40 kJ délivrés sur cible), et au Japon, à l'Université d'Osaka, qui possède le laser Gekko 12 (12 faisceaux pour 15 kJ délivrés sur cible). L'attaque indirecte a également été beaucoup étudiée aux États-Unis à l'aide des installations du

laboratoire de Livermore (en particulier avec le laser Nova, qui comportait 10 faisceaux de 3 kJ) et en France avec le laser Phébus du CEA (2 faisceaux de 3 kJ) installé à Limeil.

Tous ces travaux expérimentaux ont permis de reproduire et de mieux comprendre les nombreux phénomènes qui interviennent dans la fusion par confinement inertiel selon l'un ou l'autre schéma : interaction laser plasma, ablation laser ou X, **thermalisation** du rayonnement en cavité, symétrie d'irradiation, implosion, etc.

Cependant, ces phénomènes, ou du moins plusieurs d'entre eux, ne pourront être expérimentés à l'échelle convenable pour réaliser la fusion qu'avec une installation laser ayant les performances adéquates en énergie, puissance et précision. Deux installations de cette dimension sont actuellement en construction dans le monde : le laser Mégajoule (LMJ) en France au Centre d'études scientifiques et techniques d'Aquitaine du CEA et le NIF (*National Ignition Facility*) à Livermore aux États-Unis.

Parallèlement à l'expérimentation laser, la simulation numérique permet d'analyser par le calcul le fonctionnement des futures cibles qui permettront de réaliser la fusion par confinement inertiel. Cette simulation a pour base la **modélisation** mathématique des phénomènes physiques qui entrent en jeu. Ces modèles sont ensuite traduits en algorithmes qui sont couplés entre eux et rassemblés dans de grands "**codes**" de calcul. Il existe au CEA/DAM-Île de France (à Bruyères-le-Châtel) une expertise dans la simulation des systèmes complexes, acquise depuis de nombreuses années, qui s'appuie sur la puissance de calcul de la machine Tera (5 **téraflops** crête) installée dans le cadre du programme Simulation. Grâce à ces moyens, les physiciens de ce laboratoire réalisent des simulations d'expériences de fusion inertielle en deux ou trois dimensions d'espace (figure 5). Ces simulations sont intégrées dans la mesure où elles prennent



NIF/LINL

La chambre d'expériences du laser *National Ignition Facility* (NIF) américain, équivalent du laser Mégajoule français.

en compte simultanément tous les mécanismes qui interviennent dans les cibles, depuis l'interaction laser-plasma jusqu'au rendement thermonucléaire du combustible.

Que serait un réacteur à fusion inertielle ?

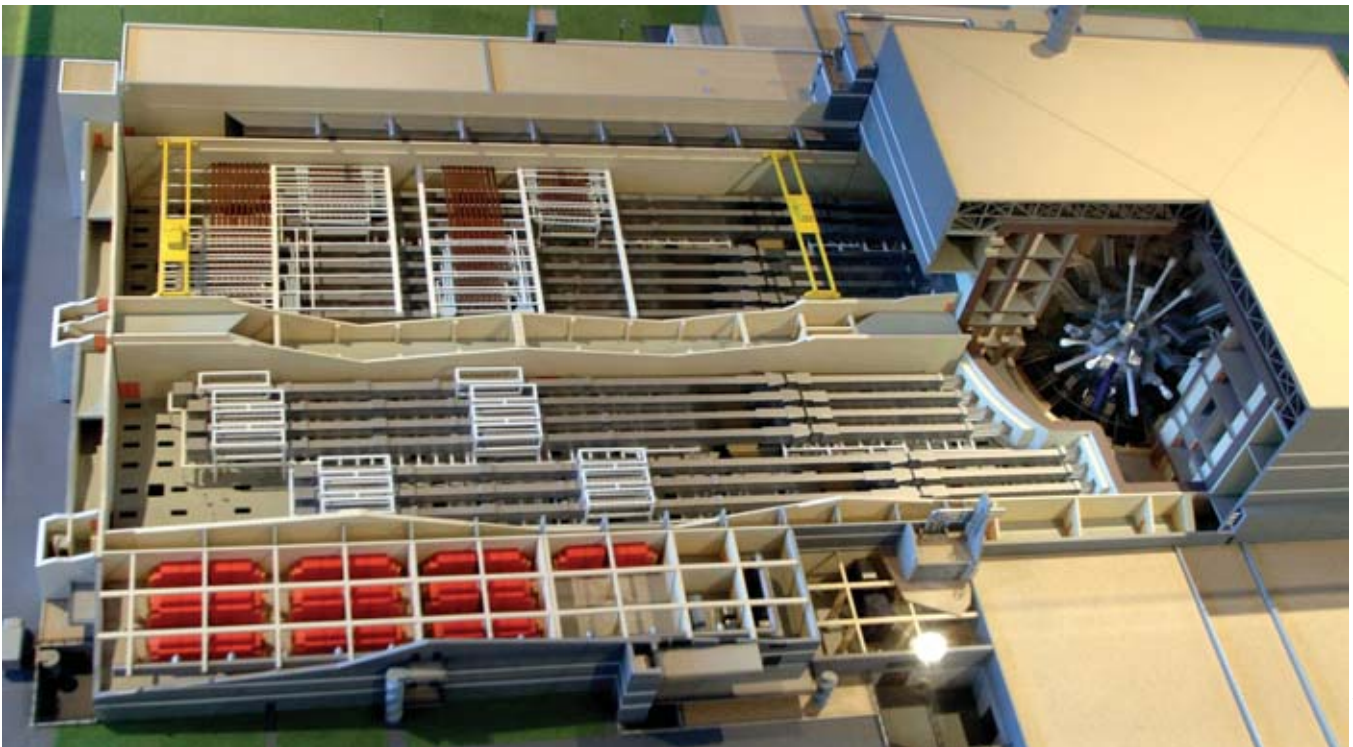
Au-delà de l'étape essentielle que constituera la réalisation de l'ignition, il faudra aussi réfléchir à ce que serait un réacteur utilisable et rentable et répondre à des questions clés : produire 1 GW électrique demandera un laser capable de délivrer à chaque seconde dix impulsions de 5 MJ chacune, avec un rendement total, vis-à-vis de l'énergie électrique consommée, meilleur que 10 %. L'énergie des neutrons de 14 MeV

produits devra être convertie en électricité avec un rendement supérieur à 30 %. Enfin, sur la base du coût actuel du GWh, les échantillons de DT devront être produits à un coût inférieur à 1 euro chacun. Des défis technologiques importants doivent donc être relevés.

Les premiers neutrons thermonucléaires produits par laser ont été obtenus à la fin des années 1960 par les équipes du CEA, au centre d'études de Limeil-Valenton. Presque cinquante ans plus tard, on projette de réaliser des implosions où, pour la première fois, l'énergie thermonucléaire produite sera supérieure à l'énergie laser investie. Ces résultats ouvriront la voie aux études pour le développement d'un réacteur à fusion inertielle.

Le laser Mégajoule : l'outil par excellence

La physique de la fusion par confinement inertiel par laser dicte les principales caractéristiques du laser Mégajoule (LMJ), en construction sur le site CEA du Cesta, près de Bordeaux. De nombreux défis technologiques ont dû être relevés.

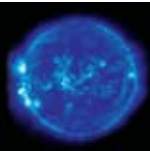


Maquette montrant l'implantation de la chambre d'expérience et la répartition des faisceaux laser (la moitié d'entre eux) dans le bâtiment LMJ.

Tel qu'il est décrit plus haut, le processus d'obtention par laser de la **fusion** d'une microcible de **DT** impose au **laser** des caractéristiques dictées par la physique de la fusion. Il faut ainsi disposer d'une énergie de l'ordre de 1,8 **mégajoule** et d'une puissance de plusieurs centaines de **térawatts** (TW) à la longueur d'onde de 351 **nanomètres**. De plus, pour assurer un éclairage homogène de la cible, la précision de pointage des faisceaux lasers doit être inférieure à 50 **micromètres** (μm). Autant de caractéristiques que doit prendre en compte le fonctionnement du LMJ (encadré p. 68).

Le matériau laser : un choix incontournable

L'expérience accumulée au CEA avec la mise en œuvre des lasers de grande énergie Phébus et Octal ont imposé naturellement le choix du matériau laser pour délivrer l'énergie requise : du verre au phosphate dopé avec des **ions** de néodyme Nd^{3+} . C'est le seul matériau que l'on sait fabriquer en grande quantité avec la qualité requise et qui peut délivrer l'énergie laser souhaitée. L'ion Nd^{3+} , porté dans un état électronique excité, émet une lumière laser à la longueur



Quelques ordres de grandeur

1,8 mégajoule (MJ)	0,5 kilowattheure (kWh) : consommation d'un téléviseur en une soirée
500 térawatts (TW)	500 000 centrales nucléaires en parallèle
100 mégabars (Mbar)	100 millions d'atmosphères
10 nanosecondes (ns), durée de l'impulsion laser et de l'implosion du microballon	temps que la lumière met à parcourir 3 mètres
400 kilomètres/seconde	Paris-Marseille en 2 secondes
1 téraflops (Tflops)	mille milliards de multiplications par seconde [une simulation peut durer des dizaines d'heures !]

d'onde de 1 053 nm qui, par conversion de fréquence, permet d'atteindre la longueur d'onde souhaitée de 351 nm.

L'énergie laser qu'il est possible d'extraire par unité de volume du matériau verre/Nd³⁺ (quelques joules/litre) impose les dimensions des pièces optiques dont il faut maîtriser la fabrication, la mise en œuvre et l'utilisation. De plus, la tenue au flux laser de ces pièces est limitée à quelques joules/cm². Au-delà, elles sont endommagées ou détruites. Les dimensions du faisceau laser, pour une énergie donnée, doivent être fixées en conséquence.

C'est en prenant en compte ces contraintes technologiques et les conditions physiques imposées par le mécanisme de fusion par **confinement inertiel** que le laser LMJ a été conçu. Il est constitué d'un ensemble de 240 faisceaux lasers délivrant chacun une énergie de 7,5 kJ à 351 nm. Cette énergie est répartie uniformément dans un faisceau de section carrée (40 × 40 cm).

Deux cent quarante faisceaux pour éclairer la microcible

Pour en simplifier la gestion simultanée, les 240 faisceaux, qui doivent avoir la même énergie et arriver en même temps (à mieux que 15 **picosecondes**) sur l'échantillon, sont transportés et focalisés sur la cible par groupes de quatre (quadruplets).

Dans le bâtiment LMJ, ces lignes sont réparties dans quatre salles disposées de part et d'autre de la chambre d'expérience contenant la microcible. Pour assurer la stabilité de l'ensemble et minimiser les problèmes de vibrations, les murs du bâtiment sont découplés des sols. Les huit faisceaux de chaque ligne laser sont regroupés en deux quadruplets. Chacun de ces quadruplets est dirigé sur l'échantillon à l'aide de miroirs de transport. Les deux trous (diamètre d'environ 300 μm) de la cavité cylindrique contenant la microcible laissent chacun passer 120 faisceaux. Pour assurer la symétrie d'éclairage, les quadruplets sont répartis selon une symétrie conique et regroupés par paquets de 10 sur trois cônes d'angles aux sommets différents.

De quoi est constitué un faisceau ?

Un grand nombre d'éléments optiques est nécessaire pour constituer un faisceau laser délivrant une énergie de 7,5 kJ à 351 nm en un temps de quelques **nano-secondes** (figure 6). Les différents éléments peuvent être regroupés en trois parties qui regroupent trois fonctions essentielles.

Mise en forme du faisceau laser

C'est la fonction qui donne au faisceau le profil temporel et la répartition spatiale d'énergie souhaitée. Les expériences prévues nécessitent de fournir des profils temporels extrêmement variés à l'intérieur d'une plage s'étendant de la centaine de picosecondes à environ 25 nanosecondes. De plus, l'énergie doit être répartie uniformément dans une section carrée. Ces profils, spatial et temporel, sont obtenus à l'aide

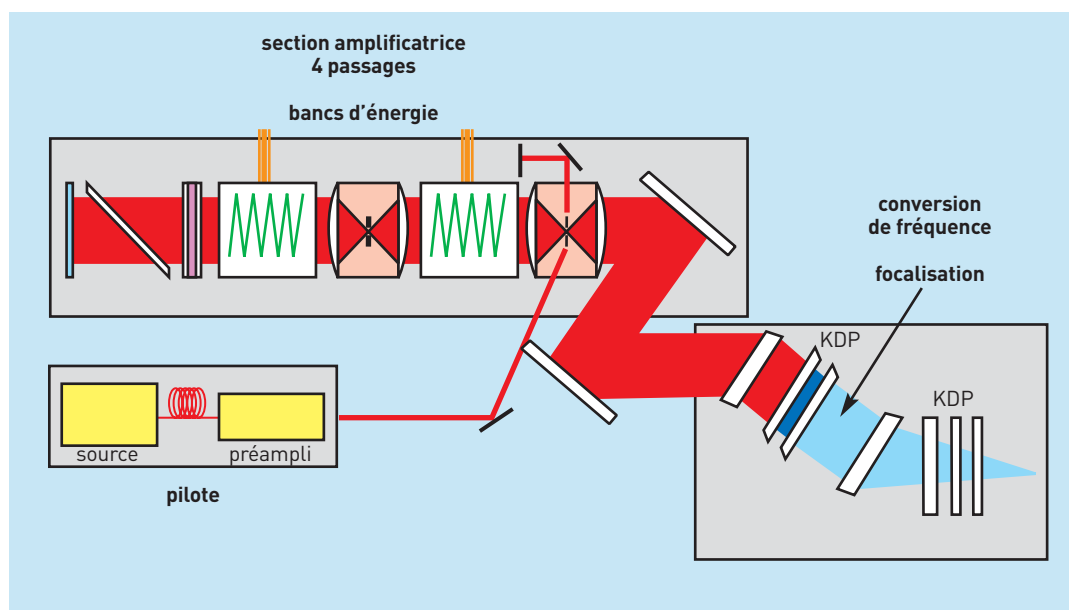


Figure 6. Schéma de base d'un faisceau laser de la LIL et du LMJ.

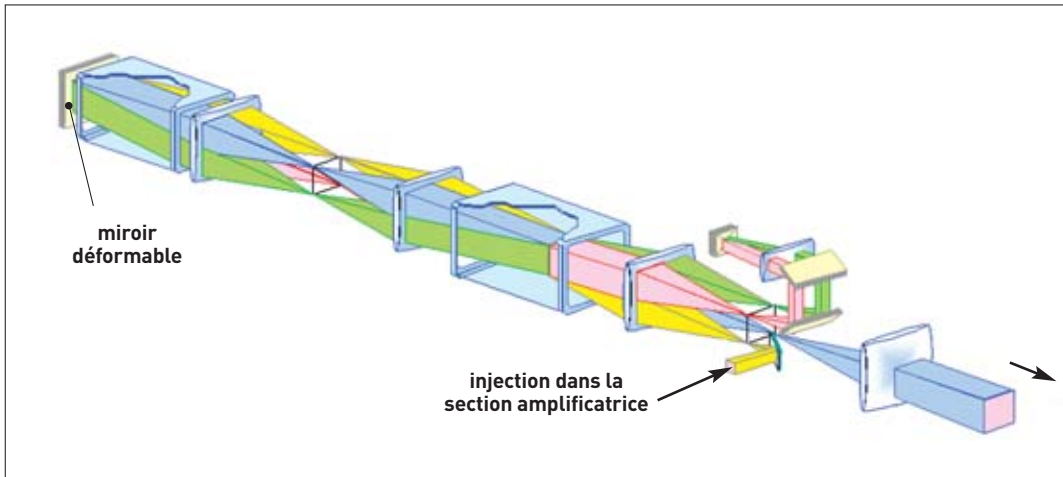


Figure 7. Les allers et retours du faisceau laser dans la section amplificatrice. Les différentes couleurs visualisent le trajet à chaque passage.

de deux éléments fondamentaux appelés la *source laser* et le *module pré-amplificateur (MPA)* qui constituent le “*pilote*” d’un faisceau laser.

La source laser est un oscillateur laser miniature qui délivre une énergie de 1 **nanojoule**. Cette source utilise les technologies bien éprouvées de télécommunication par fibres optiques. Sa stabilité est le point crucial : la longueur d’onde d’émission est fixée à 1 053 nm à mieux que ± 5 **picomètres**. C’est dans cette source qu’est effectuée la mise en forme temporelle, ajustable à la demande entre quelques centaines de picosecondes et 25 nanosecondes.

L’impulsion issue de la source laser est injectée dans le module pré-amplificateur pour porter l’énergie disponible à quelques centaines de mJ (soit un facteur d’amplification d’environ $\approx 10^9$). C’est dans ce module qu’est effectuée et contrôlée la répartition d’énergie sur une surface carrée de 4×4 cm. Une valve optique adressable (300×300 pixels) permet, en chaque point du faisceau, de fixer l’intensité afin d’assurer son uniformité spatiale.

Amplification du faisceau

C’est dans la section amplificatrice (SA) qu’est injectée l’énergie issue du MPA pour la porter à 18 kJ. Cette impulsion traversera quatre fois deux ensembles de plaques amplificatrices à verre Nd^{3+} ($40 \times 80 \times 4$ cm). Ces plaques stockent de l’énergie lumineuse fournie par des lampes à éclairs. À chaque traversée, le faisceau laser prend une partie de cette énergie. Le gain en énergie de chaque plaque et à chaque passage est de 1,25. Entre les deux ensembles de plaques, des lentilles focalisatrices associées à un diaphragme (trou de filtrage spatial) éliminent d’éventuels faisceaux parasites. À la suite des deux ensembles de plaques est disposé un miroir réfléchissant (M1) qui rend possible les quatre passages par multiplexage angulaire (figure 7). Ce miroir est du type adaptatif : sa surface est déformable (contrôlée par des poussoirs piézo-électriques) et permet de corriger d’éventuels défauts de la surface d’onde du faisceau.

Une des originalités des faisceaux lasers du LMJ est la possibilité d’effectuer les quatre passages dans une même plaque amplificatrice (figure 7). Cela permet de diminuer le nombre de plaques nécessaires, d’augmenter le rendement global du laser en extrayant

le maximum d’énergie stockée dans les plaques et de diminuer les dimensions du bâtiment, en repliant sur lui-même le trajet optique du faisceau.

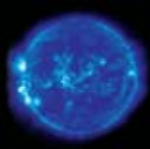
Conversion de fréquence et focalisation du faisceau

Le changement de fréquence est assuré par des cristaux de KDP (dihydrogénophosphate de potassium). Ces cristaux biréfringents ont la propriété, dès que l’intensité du laser est importante (on parle de régime non linéaire), de permettre avec une bonne probabilité à des couples de **photons** de fusionner et d’ajouter leur énergie pour donner naissance à un seul



La chambre d’expérience de la LIL en cours d’équipement. Les premières expériences sont prévues pour le courant de 2004.

G. Rollet/REAN/CEA



photon d'énergie somme. Deux cristaux sont nécessaires. Le premier double la fréquence du faisceau à 526,5 nm avec un rendement d'environ 50 %. En faisant interagir dans un second cristal l'onde résiduelle à 1053 nm et l'onde à 526,5 nm, une onde de fréquence triple à 351 nm est obtenue avec un rendement d'environ 60 %. Les ondes (à 1053, 526,5 et 351 nm) se propagent alors ensemble. Il faut les séparer spatialement pour que seule l'onde à 351 nm atteigne l'échantillon. C'est un réseau de diffraction qui assure cette fonction. De type holographique, ce réseau est conçu pour réaliser à la fois la séparation spectrale et la focalisation du faisceau laser sur l'échantillon. Cette caractéristique, qui évite l'usage d'une lentille focalisatrice et diminue le nombre de pièces optiques pouvant être endommagées, est une des originalités du laser LMJ.

La chambre d'expérience

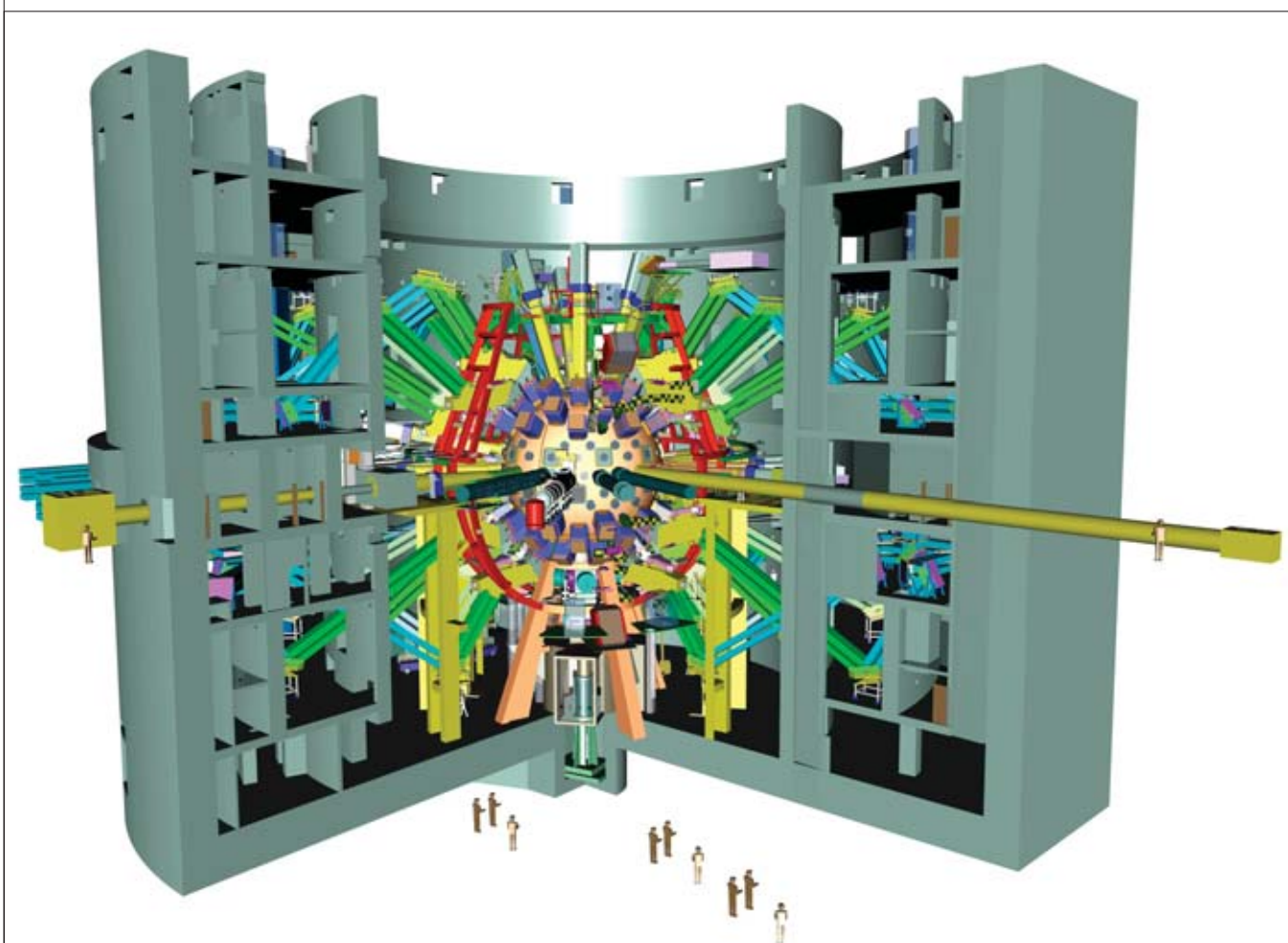
La microcible à étudier sera disposée au centre d'une chambre d'expérience sphérique maintenue sous vide. D'une épaisseur de 10 centimètres, recouverte d'un béton **neutrophage** de 40 cm d'épaisseur et d'un diamètre de 10 mètres pour un poids de 90 tonnes, elle sera abritée dans un bâtiment de 50 mètres de hauteur (35 m hors sol) pouvant contenir l'Arc de triomphe. Des fenêtres transparentes à 351 nm, disposées le long des méridiens, permettent l'entrée des faisceaux. Tout autour de la chambre seront installés les dispositifs de diagnostic qui mesureront

et transmettront à un système informatique les données expérimentales obtenues. La cible devra être positionnée au centre de la chambre avec une précision de +/- 5 µm et maintenue à moins de 20 K avec une stabilité thermique inférieure au millième de kelvin. C'est incontestablement un défi technologique que relèvera le laser LMJ en assurant une telle précision sur un bâtiment de quelque 300 mètres de long et après un parcours optique des 240 faisceaux laser de plusieurs centaines de mètres.

La Ligne d'intégration laser pour prototype

Plutôt que de se lancer directement dans la construction du LMJ et de ses 240 faisceaux, il a été décidé de construire un prototype afin de valider les choix technologiques et optimiser les performances en termes de coût et de maintenance. Sous le nom de LIL, la Ligne d'intégration laser (LIL) reproduira deux des soixante quadruplets du laser LMJ et comportera donc un ensemble de huit faisceaux. Chacune des fonctions nécessaires au LMJ se retrouve dans ce prototype.

Un premier faisceau a été entièrement équipé et a donné les performances prévues et même au-delà, puisque le 4 avril 2003 une énergie de 9 **kilojoules** a été obtenue à 351 nm après conversion de fréquence. Un quadruplet complètement équipé courant 2004 permettra le démarrage des premières expériences. Les autres faisceaux seront progressivement montés.



Coupe du bâtiment abritant la chambre d'expérience du LMJ.

Les microcibles cryogéniques, éléments clés des expériences de confinement inertiel sur le LMJ

Le contraste est total entre la dimension impressionnante des chaînes lasers du LMJ et la taille minuscule des cibles des expériences de confinement inertiel sur lesquelles elles convergent. Ces microcibles sont également des concentrés de haute technologie.

Les cibles du laser Mégajoule (LMJ) doivent être conçues pour amener une très faible quantité de mélange fusible DT dans des conditions de densité et de température telles que les réactions de fusion thermonucléaire puissent s'amorcer. Leur processus de fabrication prend donc en compte les contraintes associées à l'obtention de ces conditions. Dans le schéma d'irradiation en attaque indirecte retenu (figure 8), les 240 faisceaux du LMJ seront focalisés sur la paroi interne d'une cavité de conversion cylindrique en or de quelques dizaines de micromètres d'épaisseur, pourvue à ses extrémités de deux ouvertures pour le passage des faisceaux laser. L'interaction laser-matière au niveau de la paroi produit une émission intense de rayons X qui vont comprimer et chauffer un microballon en polymère amorphe hydrocarboné (ou deutéré) d'environ 2 mm de diamètre et 0,2 mm d'épaisseur. Celui-ci, maintenu au centre géométrique de la cavité, contient le mélange DT fusible, solidifié à très basse température (environ 18 kelvins, soit - 255 °C). La géométrie et les conditions de mise en œuvre sont donc très contraignantes. La précision de réalisation



Geney-Burdin/CEA

Préparation de la microcible d'une expérimentation de fusion inertielle.

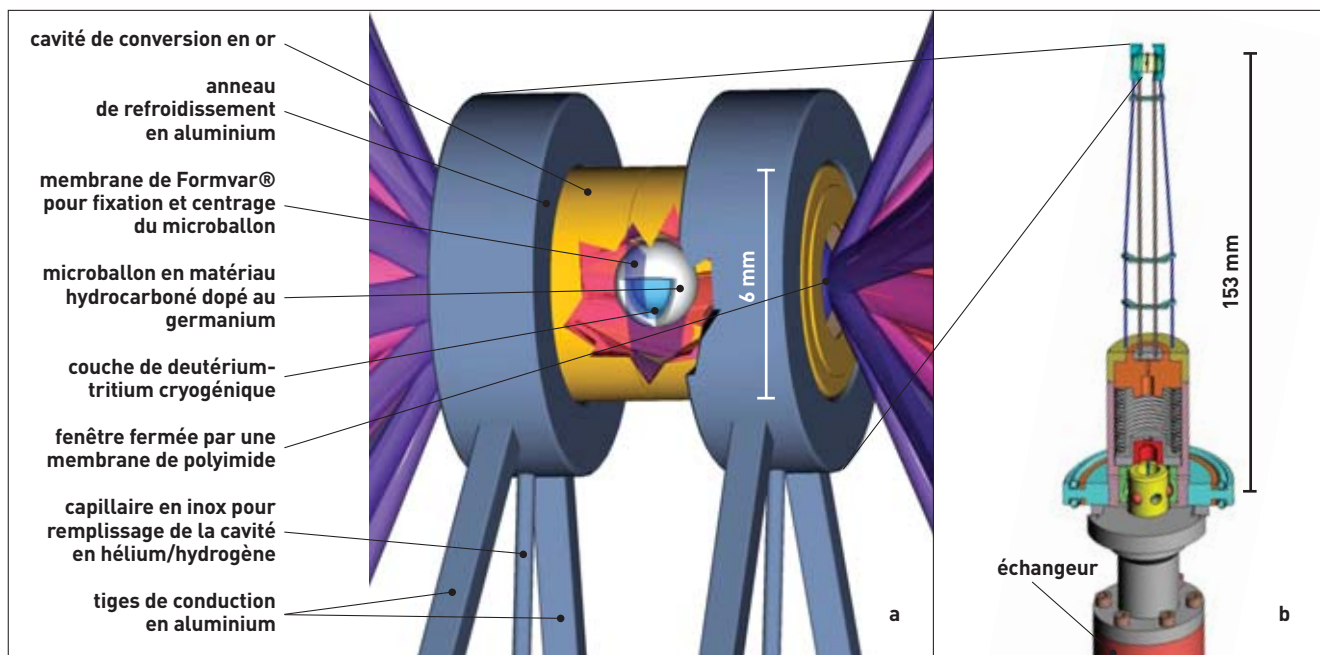


Figure 8. Principe de fonctionnement d'une cible pour fusion par confinement inertiel en attaque indirecte. En (a), l'ensemble du dispositif de la cavité cryogénique de conversion ; en (b), l'édifice cible.

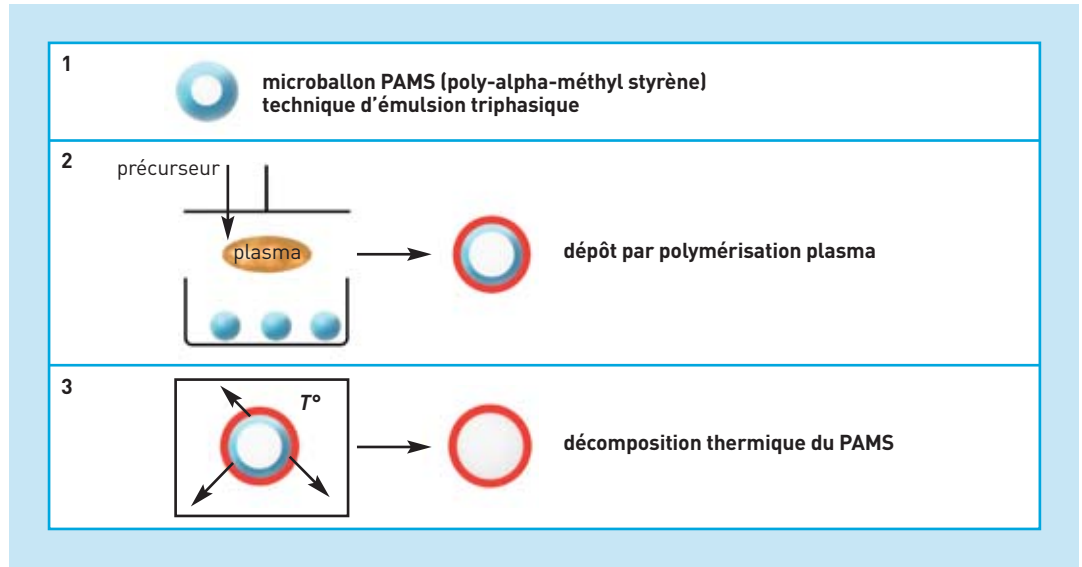
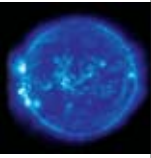


Figure 9. Étapes de la synthèse des microballons par la technique du "mandrin dépolymérisable".

des différentes pièces et des assemblages sont par ailleurs excessivement sévères, de l'ordre du pour mille au pour cent mille en fonction des éléments. Elles imposent donc le développement et la mise en œuvre de technologies très sophistiquées. Depuis 1996, la recherche et le développement ont fait d'énormes avancées dans quatre domaines principaux : le microballon lui-même, les équipements cryogéniques destinés à remplir les cibles, la qualité de la couche de DT solide déposé sur la paroi interne du microballon et l'édifice cible cryogénique dans son ensemble.

Le microballon en CH_x

Le conteneur du mélange fusible est un microballon en hydrocarbures (CH_x), dopés de manière parfaitement homogène à 0,4 % de germanium. Ses défauts géométriques sont inférieurs à un dix-millième, et sa rugosité interne et externe est inférieure à 50 nm. Pour obtenir un tel résultat, chacune des étapes de la synthèse doit être parfaitement contrôlée.

Les microballons en CH_x sont élaborés suivant la technique dite du "mandrin dépolymérisable", qui comporte plusieurs étapes (figure 9). Un mandrin sphérique en poly-alpha-méthyl styrène (PAMS) est d'abord réalisé selon des techniques de micro-encapsulation mettant en œuvre des systèmes d'injecteurs triphasiques. Disposer d'un polymère de départ (le PAMS) dont les caractéristiques physico-chimiques sont parfaitement contrôlées est indispensable pour obtenir les spécifications visées lors de la mise en forme par micro-encapsulation. Sur ce mandrin est ensuite réalisé un dépôt GDP (*Glow Discharge Polymerization*) de polymère plasma à partir de trans-2-butène (T2B) et d'hydrogène (H₂). Le mandrin initial est finalement dépolymérisé par traitement thermique sous gaz neutre. Le PAMS, dont la température de décomposition est inférieure à celle du polymère plasma en CH_x, est éliminé par perméation au travers de la paroi du dépôt GDP. Un microballon en CH_x autoporté est alors obtenu.

À ce jour, l'ensemble de la chaîne technologique a été mise en place. Les études ont permis de synthétiser des objets dont les défauts, inférieurs au %, ne sont plus décelables avec des moyens optimisés de caractérisation optique ou X. Des outils de caractérisation très précis et basés sur la technologie AFM (microscopie à force atomique) sont devenus nécessaires.

Des équipements cryogéniques opérationnels pour remplir les cibles

Les microballons en polymère sont remplis par perméation gazeuse à température ambiante : le mélange de DT diffuse à travers la paroi de polymère et remplit le ballon. Une couche solide de 100 µm d'épaisseur doit alors être déposée sur la paroi intérieure, la solidification

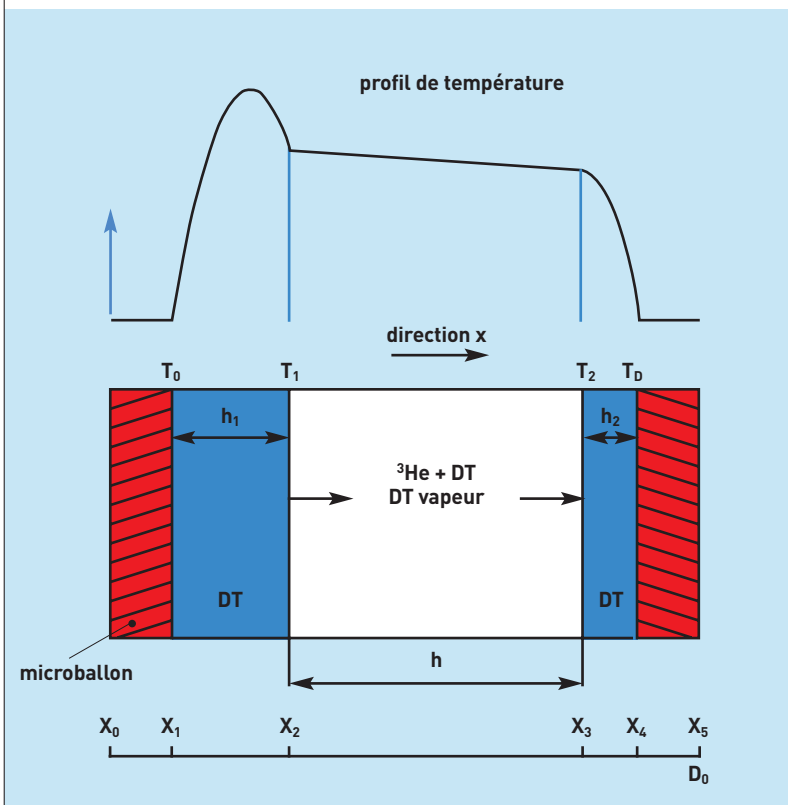


Figure 10. Principe de la redistribution naturelle du DT.

du DT s'effectuant à environ 20 K. Le nombre de moles de DT permettant d'obtenir, une fois solidifié à 20 K, une couche de 100 μm de DT, correspond à une température ambiante d'environ 500 bars. Or, la résistance mécanique des microballons est de l'ordre de quelques dizaines de bars. Il faut donc équilibrer les pressions entre l'extérieur et l'intérieur du microballon en permanence pour éviter l'éclatement du ballon.

La pression de l'enceinte de remplissage est augmentée progressivement pour assurer à chaque instant un équilibre des pressions entre l'intérieur et l'extérieur du microballon jusqu'à atteindre la pression de 500 bars. Le nombre requis de moles de DT à l'intérieur du ballon étant atteint, la température de l'enceinte de remplissage est alors diminuée pour faire chuter la pression et l'enceinte de remplissage progressivement vidée. Au point de solidification du DT à 19,79 K, la pression résiduelle à l'intérieur du ballon est de l'ordre de 200 millibars, correspondant à la pression de vapeur saturante du DT. Le microballon peut alors supporter sans aucun problème une telle différence de pression et être sorti de son enceinte de remplissage. Sa température ne doit cependant pas remonter de plus d'une dizaine de degrés, sous peine d'éclatement. La chaîne du froid ne doit donc plus être rompue jusqu'au moment du tir laser. Les édifices cibles cryogéniques, fabriqués, remplis puis conditionnés sur le site de Valduc (Côte-d'Or) du CEA, seront donc ensuite transportés à température cryogénique sur le site du LMJ, en Gironde, pour l'expérimentation.

La conformation de la couche d'isotopes d'hydrogène solide

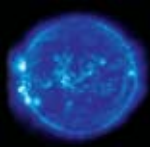
Après remplissage et congélation, le DT tombe par microgravité au fond du microballon. Il faut qu'il se

redistribue sur les parois internes du ballon sous la forme d'une fine pellicule d'épaisseur parfaitement homogène (figure 8a) pour créer la fine coquille de DT solide nécessaire aux expériences de fusion. Cette redistribution se fait naturellement : c'est le processus de *beta-layering* qui utilise la chaleur produite par la décroissance radioactive du tritium. Le principe peut être expliqué simplement par une représentation bidimensionnelle où les deux côtés opposés du microballon sont représentés par deux plans parallèles (figure 10). La décroissance du tritium conduit à l'émission d'un électron qui crée une source volumique de chaleur dans le DT solide. Au démarrage du processus, la couche de DT est plus épaisse au fond du microballon, la chaleur dégagée y est donc plus importante. La résolution des équations de diffusion de la chaleur montre que la température à l'interface DT solide/DT gaz y est légèrement plus élevée. Cet écart de température induit un phénomène de sublimation/recondensation au point froid du DT solide. Petit à petit, le DT se dépose sur toute la surface interne du ballon par ce phénomène, à la stricte condition que la température soit homogène sur la surface externe du ballon ; l'état d'équilibre thermodynamique correspond alors à une couche de DT d'épaisseur homogène.

Le phénomène de redistribution naturelle permet d'obtenir ainsi des couches d'épaisseur homogène. Cependant, pour éviter le développement d'instabilités hydrodynamiques lors de l'implosion, la rugosité de surface de la couche de DT doit être submicroscopique (voir plus haut *Combattre les instabilités hydrodynamiques*), ce qui est impossible à obtenir en redistribution naturelle. Pour aider la nature, un flux de chaleur additionnel est délivré par un laser



Prototypage du porte-cible cryogénique (PCC) en cours d'exploitation en collaboration entre le CEA/Grenoble (Service des basses températures) et le Cesta (Département des lasers de puissance). Cet équipement livré en 2002 a permis de valider les performances de régulation thermique de la pince cryogénique. Les performances mécaniques (précision de positionnement et chargement d'une cible sous vide, à froid, et en mode entièrement automatique) sont en cours de démonstration.



L'édifice cible cryogénique

Pour éviter l'endommagement du porte-cible cryogénique (PCC) par l'énergie dégagée lors d'un tir à gain, il est nécessaire de maintenir la cavité à une distance de 100 mm de son embase par une structure de faible poids en matériau de **numéro atomique Z faible** (figure 8b). Cette fonction est assurée par une tourelle, elle-même solidaire d'une embase permettant, entre autres, la connexion au porte-cible cryogénique.

Concernant l'assemblage de la cavité de conversion, la partie la plus délicate et contraignante consiste à centrer un microballon de 2,4 mm de diamètre au centre d'une cavité cylindrique de 6 mm de diamètre. La cavité est constituée de deux demi-cylindres sur lesquels un film de polymère souple en Formvar® est posé tendu. Un perçage au centre de ces films est réalisé par usinage laser, le diamètre des trous réalisés étant inférieur à celui du microballon. Ce dernier est alors déposé sur le trou d'une des parties de la cavité à l'aide de déplacements micrométriques et d'un système de maintien par aspiration. La deuxième partie de la cavité est ensuite placée au-dessus du microballon, de manière à l'enserrer entre les deux films et à fixer sa position en assemblant les deux parties de la cavité. L'ajustement des diamètres des deux trous et leur centrage permettent de faire le centrage dans les directions x, y et z du microballon. Les tolérances de positionnement requises de $\pm 30 \mu\text{m}$ selon les trois axes ont d'ores et déjà été obtenues.

L'aboutissement de ces différentes études et mises au point sur la conception et la fabrication des échantillons permettra à cet outil exceptionnel qu'est le LMJ de réaliser, à la fin de la décennie, les expériences tant attendues sur l'ignition du DT en laboratoire par fusion inertielle et ses applications.

Bâti d'assemblage, au centre CEA du CESTA, des microcibles préparées au centre CEA de Valduc pour la LIL et le futur LMJ. Le collage s'effectue à main levée sous contrôle visuel par loupe binoculaire et deux caméras permettent de le visualiser sur écran.

infrarouge accordable: sa longueur d'onde est fixée sur des bandes d'absorption du mélange DT solide qui absorbe ainsi le rayonnement laser et voit sa température s'élever. Cette chaleur additionnelle permet d'amplifier et de contrôler le phénomène de redistribution du DT et de réduire la rugosité de surface. Les premières couches redistribuées par infrarouge ont été obtenues récemment et les études se poursuivent pour atteindre les spécifications souhaitées.

➤ **Philippe Baclet^(a), Claude Rullière^(b), Guy Schurtz^(c) et Jacques Tassart^(d)**

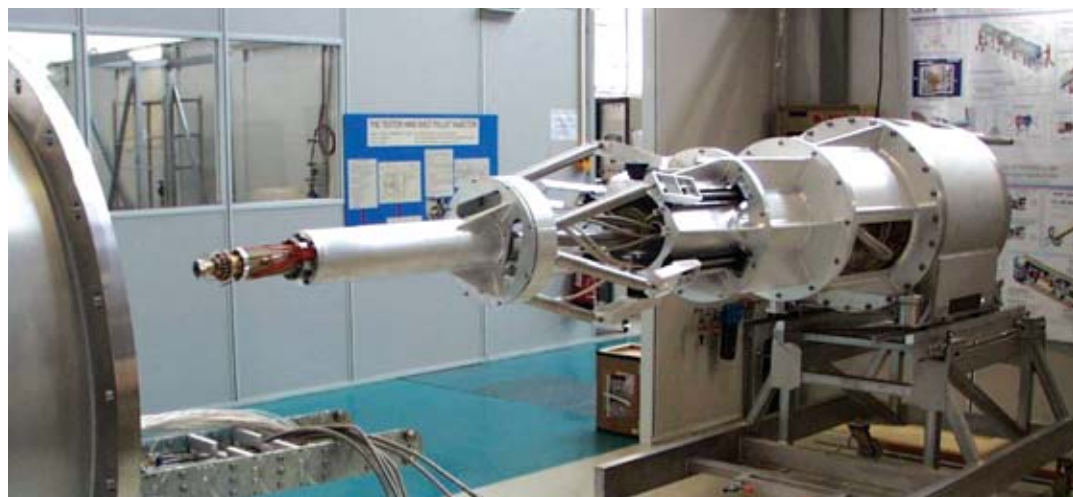
Direction des applications militaires

(a) CEA centre de Valduc

(b) CEA Centre d'études scientifiques et techniques d'Aquitaine (Cesta)

(c) CEA Cesta et UMR Celia (Centre lasers intenses et applications - CNRS)

(d) CEA/DAM-Île de France (DIF)



Partie mobile du porte-cible cryogénique en cours d'études par le CEA/DAM en collaboration avec le Service des basses températures (DSM/DRFMC) à Grenoble, et au bout de laquelle se fixe l'ensemble représenté en figure 8b. On aperçoit l'extrémité de l'enceinte à vide à gauche au premier plan.

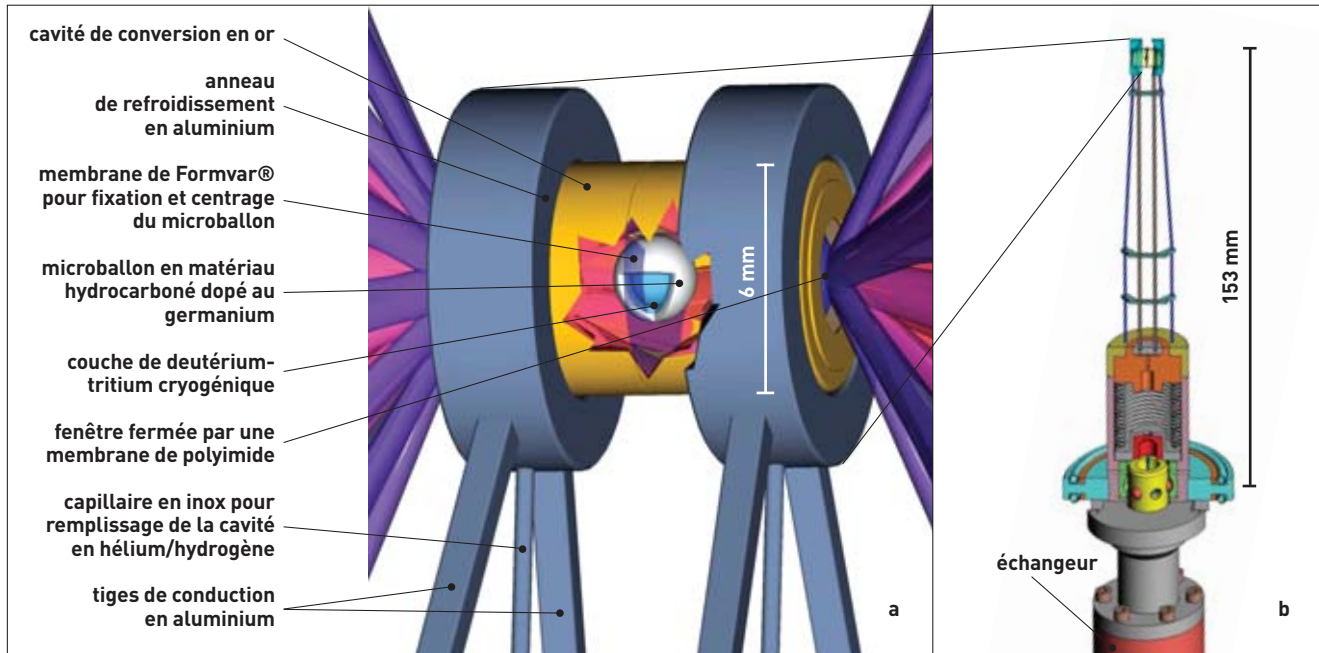


Figure 8. Principe de fonctionnement d'une cible pour fusion par confinement inertiel en attaque indirecte. En (a), l'ensemble du dispositif de la cavité cryogénique de conversion ; en (b), l'édifice cible.