

La cible sera placée dans une enceinte cylindrique en or ; les faisceaux laser qui pénétreront par deux trous situés sur l'axe seront répartis sur trois nappes, assurant ainsi (d'après les calculs) la meilleure symétrie pour l'irradiation de la capsule. Cette dernière sera une coquille sphérique creuse de matériau plastique, sur la paroi interne de laquelle sera solidifiée une couche du mélange deutérium-tritium. Au centre, ce mélange sera sous forme gazeuse.

La mise en condition de fusion thermonucléaire du combustible suppose des vitesses d'implosion supérieures à 300 000 mètres par seconde, ce qui conduit à des températures radiatives de l'ordre de trois millions de degrés. La pression d'ablation engendrée par une telle température est supérieure à 100 millions d'atmosphères. C'est pour éviter que l'application brusque d'une telle pression ne crée un choc violent générateur de désordre que la puissance du laser augmentera progressivement. Lorsque le choc initial parviendra au centre, dans le mélange fusible gazeux, ce dernier sera chauffé et un point chaud n'apparaîtra qu'au centre de la capsule. Ainsi sera minimisée l'énergie du laser nécessaire : 1,8 mégajoule à la longueur d'onde de 0,35 micromètre.

Les éléments d'un laser Mégajoules

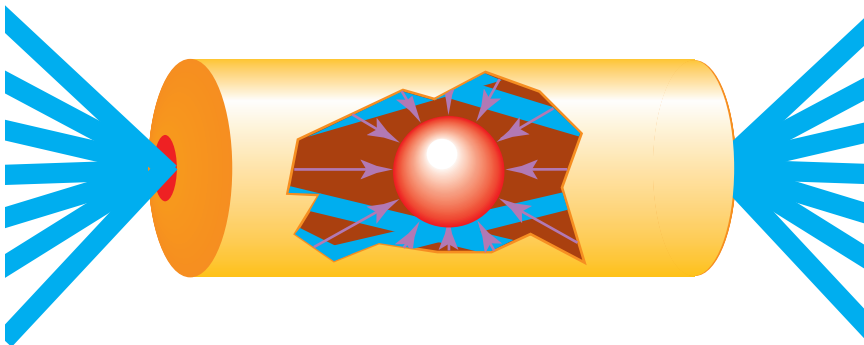
Divers types de lasers ont été employés pour les études de confinement inertiel, mais seul le laser à verre dopé au néodyme a atteint une maturité technique suffisante pour qu'on puisse l'envisager dans le projet *Mégajoules* (ainsi que dans le projet américain). Toutefois, ce laser émet une onde lumineuse à une longueur d'onde de 1,05 micromètre, trop longue pour atteindre les performances visées. On a donc décidé de transformer son rayonnement en un rayonnement de fréquence trois fois supérieure. Le rendement de la conversion ne dépassant pas 50 à 60 pour cent sur la durée totale de l'impulsion, c'est une énergie de 4 mégajoules qu'il faut obtenir, soit 200 fois l'énergie du laser *Phébus*. Si le laser *Mégajoules* était construit sur le même principe que le laser *Phébus*, il serait un monstre d'un coût rédhibitoire : les laséristes du CEA et du laboratoire Lawrence Livermore ont donc cherché une nouvelle architecture.

Le laser *Phébus*, est construit, comme ses prédécesseurs, suivant le concept de l'amplification en ligne : un laser classique engendre une impulsion de base, qui est ensuite mise en forme (spatiale et temporelle) par des dispositifs électro-optiques. À ce stade, l'énergie de l'impulsion est inférieure à quelques microjoules. Pour l'amplifier d'un facteur 100 millions à 1 000 millions, on l'envoie dans une

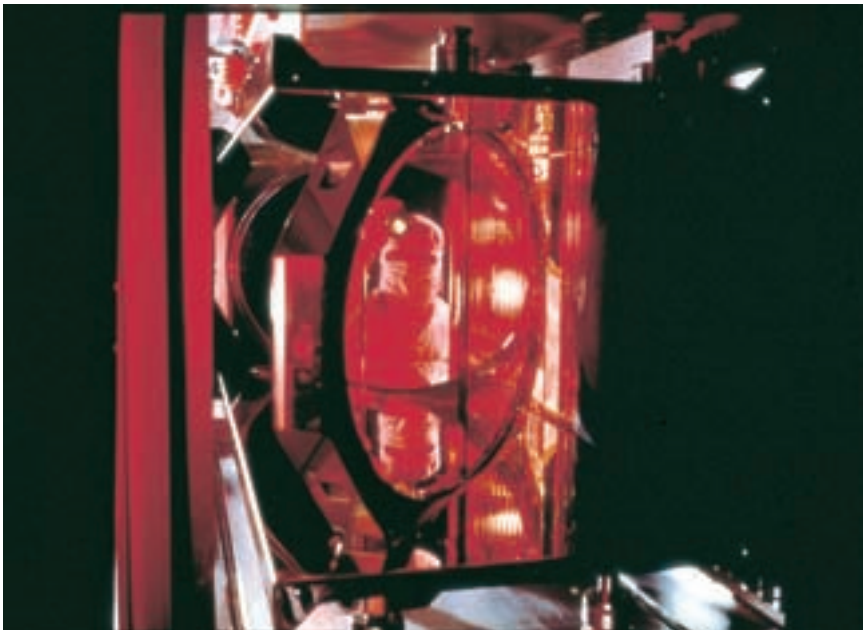
succession d'amplificateurs de diamètres croissants (de 1 à 46 centimètres pour le laser *Phébus*), afin de conserver des densités d'énergie qui n'endommagent pas les matériaux optiques. Les plus fragiles sont les couches minces, déposées sur le verre par évaporation sous vide ou par traitement physico-chimique, afin de le rendre réfléchissant ou, au contraire, parfaitement transparent.



5. LA CHAMBRE D'EXPÉRIENCES du système *Phébus*, vu par dessous, à l'intérieur. Le disque central est le fond du système de descente de la cible. Les tubes qui convergent vers le point où la cible est descendue sont des systèmes de mesures : appareils photographiques à sténopé (où l'optique est réduite à un trou), spectrophotomètres, capteurs pour les mesures de température, de pression et d'énergie...



6. LE LASER MÉGAJOULES obtiendra la fusion d'un mélange de deutérium et de tritium par une attaque indirecte : la cible est un cylindre en or, où se trouve la capsule d'implosion. Les 240 lasers du système *Mégajoules* viendront chauffer l'or, qui réémettra des rayons X de façon isotrope (flèches violettes).



7. ÉLÉMENT D'AMPLIFICATION du laser Phébus. Des flashes disposés autour des plaques de verre excitent les atomes de néodyme (pompage optique) ; lors du passage du faisceau laser, le retour des atomes excités à l'état fondamental amplifie le faisceau (émission stimulée).

On augmente encore l'énergie en multipliant le nombre de faisceaux qui amplifient tous la même impulsion initiale (deux sur le laser *Phébus*, dix sur le laser *Nova*). Entre les amplificateurs, des systèmes optiques augmentent le diamètre du faisceau tout en le gardant parallèle ; des diaphragmes éliminent les déformations de la surface d'onde introduites par les inévitables hétérogénéités des milieux traversés.

De surcroît, des dispositifs électro-optiques ou magnéto-optiques empêchent la petite quantité de lumière réfléchiée sur la cible ou sur certaines surfaces optiques d'être réamplifiée en retour. Une telle structure, qui a fait ses preuves, a l'inconvénient de comporter un nombre élevé de composants différents et d'avoir un faible rendement : moins de un pour 1 000 dans le laser *Phébus*.

Le laser *Mégajoules*, lui, comportera 240 faisceaux de section carrée, constante sur toute la longueur de la section d'amplification. Ces faisceaux seront regroupés par huit, dans 30 cylindres convergeant vers la chambre ; ce regroupement des faisceaux, qui a déjà été testé dans des maquettes, permet de réaliser des boîtes de lumière plus efficaces, où la lumière des lampes flash qui excitent les atomes de néodyme sera mieux utilisée, augmentant ainsi l'un des facteurs de rendement total.

Deuxièmement, chaque faisceau délivrera une énergie de près de 20 kilojoules, à une longueur d'onde de 1,05 micromètre, contre 10 kilojoules pour *Phébus*, à surface égale. L'impulsion sera plus longue, et les couches minces, réalisées par un procédé sol-gel (on dépose sur le verre un gel qui contient les atomes optiquement actifs, puis on évapore le solvant), résisteront mieux aux densités d'énergie élevées.

Troisièmement, au lieu de passer une seule fois dans plusieurs amplificateurs successifs, chaque faisceau passera quatre fois dans le même. C'est la première fois que cette technique du multipassage est employée, dans un ensemble aussi important. Le rendement est augmenté, en raison d'une meilleure récupération de l'énergie, lorsque les atomes de néodyme excités reviennent dans leur état fondamental.

Globalement le rendement du laser *Mégajoules* devrait être 10 à 20 fois supérieur à celui de *Phébus*, avec une conception qui réduit le nombre de types de composants ; chacun d'eux pourra donc être produit en série, à un coût unitaire réduit.

La chambre d'expérience sera une enceinte où l'on aura fait le vide ; y sera disposée, au centre exact, la cible, sur laquelle seront focalisés les 240 faisceaux du laser. C'est la chambre qui supportera l'ensemble des moyens de mesure, qui diagnostiqueront son

fonctionnement, et c'est elle qui contiendra tous les effets de la fusion thermonucléaire (effets thermiques ou effets mécaniques, telle l'onde de choc qui provient de l'implosion). Pour *Phébus*, la chambre est une sphère d'aluminium de 2,3 mètres de diamètre, avec des parois de 12 centimètres d'épaisseur ; pour le laser *Mégajoules*, une telle chambre serait insuffisante. Les physiciens du CEA étudient, avec le concours d'industriels, une chambre sensiblement sphérique de dix mètres de diamètre, avec un diamètre intérieur assez grand pour éviter la vaporisation de la surface interne sous l'action des rayons X dégagés par la fusion. L'épaisseur de sa paroi atteindra un mètre : 80 centimètres d'un matériau absorbant de neutrons seront compris entre deux couches d'aluminium, de 10 centimètres d'épaisseur chacune. La masse totale sera supérieure à 600 tonnes !

Depuis plus de 20 ans, des équipes ont inlassablement perfectionné la fabrication des cibles et la mise au point des méthodes de diagnostic du plasma. Leur tâche est difficile, en raison de la petitesse de la cible à réaliser (entre 0,1 et 1 millimètre) et de la grande précision à obtenir : pour éviter le développement d'instabilités hydrodynamiques, par exemple, la rugosité de la surface de la capsule doit être inférieure à quelques centièmes de micromètres. La nouveauté, pour le laser *Mégajoules*, est surtout que la cible devra être maintenue à une température de $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ jusqu'à l'instant de l'expérience. Naturellement le dispositif de maintien en froid et de positionnement de la cible dans la chambre devra être rétracté juste avant la mise en fonctionnement du laser.

La multiplication des moyens de mesure, qui permettent un diagnostic précis de l'expérience, est une autre clé de succès. Elle est plus importante qu'avec le laser *Phébus*, parce que la fréquence des expériences sera limitée : on devra attendre la décroissance de la radioactivité induite dans la chambre avant de préparer l'installation pour un nouveau tir. Les mesures calorimétriques permettront d'établir un bilan de l'énergie, et l'on explorera les émissions du plasma dans toute la gamme X, ainsi que l'émission de neutrons, pour sonder la matière comprimée. Pour obtenir une triple résolution spectrale, spatiale et tem-