

flexions contre les parois. Ainsi, les diverses ondes ne sont plus cohérentes à la sortie de la fibre, et elles n'interfèrent pas.

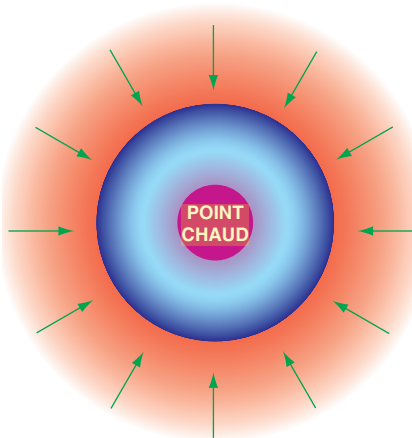
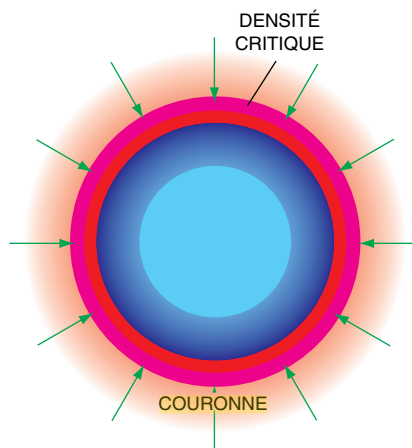
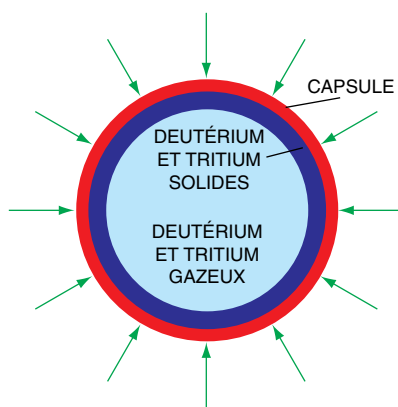
Les simulations sur ordinateur montrent que, pour atteindre un gain suffisant, l'éclairement ne doit pas varier de plus de un pour cent d'un point à un autre de la capsule. C'est une condition redoutable, même si des progrès importants ont été récemment effectués à l'Université de Rochester, avec l'installation *Omega-Upgrade*, qui focalise 60 faisceaux sur une cible.

Aussi, une autre façon d'irradier les cibles a été imaginée et étudiée abondamment, depuis longtemps. Dans cette méthode d'«attaque indirecte», on focalise les faisceaux laser sur la face interne d'une enceinte en matériau de numéro atomique élevé, généralement de l'or. Sous l'action du rayonnement, cette paroi est chauffée, et elle émet un rayonnement X intense, qui est confiné à l'intérieur de l'enceinte. Cette dernière constitue alors une sorte de four pour la capsule qui s'y trouve placée.

Le rôle du four est double : il thermalise le rayonnement, qui devient proche d'un rayonnement de corps noir, et il l'homogénéise par réflexions multiples. Ainsi obtient-on une homogénéité d'éclairement plus facilement qu'en attaque directe, pourvu que la zone interne irradiée soit judicieusement positionnée, que la forme et les dimensions de l'enceinte soient optimisées, et que soit minimisé le défaut introduit par les trous de l'enceinte, indispensables pour laisser passer les faisceaux, mais qui laissent fuir une partie des rayons X.

L'attaque indirecte a été beaucoup étudiée ces dernières années au Laboratoire Lawrence Livermore avec le laser *Nova*, au Japon avec le laser *Gekko 12*, et à Limeil-Valenton avec le laser *Phébus*. Les physiciens ont étudié la conversion du rayonnement laser en rayonnement X, les températures de rayonnement atteintes en cavité et l'homogénéité d'irradiation de la capsule, en fonction des paramètres géométriques et des conditions d'éclairement.

L'avantage incontestable de l'attaque indirecte a toutefois un prix : en introduisant une étape supplémentaire, la conversion X, qui n'a pas un rendement de 100 pour cent, elle nécessite des énergies de laser



3. LES CIBLES qui seront utilisées dans le laser *Mégajoules* seront composées d'une capsule en verre ou en matière plastique (en rouge, sur l'image supérieure), sur la paroi interne de laquelle on condensera un mélange de deutérium et de tritium, fortement refroidis (en bleu) ; le centre de la capsule contiendra le deutérium et le tritium gazeux. Quand on éclairera cette cible à l'aide d'un laser, on vaporisera la capsule (au centre), ce qui, par réaction, projetera le deutérium et le tritium condensés vers le centre. Si l'augmentation de puissance lumineuse et l'épaisseur de la couche condensée sont appropriées, on obtiendra finalement, au centre de la capsule, une zone où la densité et la température permettent la fusion nucléaire (en bas).

supérieures à celles qui seraient théoriquement nécessaires en attaque directe ; toutefois, dans cette dernière méthode, les instabilités hydrodynamiques forcent à utiliser des énergies qui sont finalement égales à celles de l'attaque indirecte.

La fusion au secours de la fusion

Jusqu'ici, nous avons implicitement supposé que, pendant la compression, le milieu fusible restait homogène, avec des densités et des températures uniformes, jusqu'à ce que les réactions de fusion deviennent prépondérantes. Toutefois, dans cette hypothèse, le calcul de l'énergie du laser nécessaire pour atteindre un gain de quelques unités conduit à des valeurs qui ne paraissent pas réalisables.

Pour contourner la difficulté, les physiciens ont imaginé d'utiliser les réactions de fusion elles-mêmes pour faciliter la combustion. Dans la technique du point chaud central, on provoque d'abord les réactions thermonucléaires au centre de la cible, afin qu'elles se propagent ensuite au reste du combustible, resté relativement froid pendant la compression.

Pour réaliser le point chaud, le centre de la cible doit être gazeux : avec moins de particules à chauffer, on obtient plus facilement la fusion d'un petit nombre de noyaux atomiques qui libèrent des particules alpha (des noyaux d'hélium) et des neutrons énergétiques. Puis le milieu «froid» autour du point chaud doit être suffisamment dense pour que les particules alpha résultant de la fusion du point chaud soient absorbées et déposent leur énergie.

Les simulations sur ordinateur montrent que cette méthode devrait procurer un taux de combustion global de 30 pour cent, correspondant à un gain suffisant (le quotient de l'énergie récupérée par l'énergie apportée), tout en minimisant l'énergie totale à investir dans le milieu.

Pour atteindre ce taux de combustion, la poussée exercée sur la capsule doit croître selon une loi parfaitement déterminée, pendant les quelque 15 à 20 nanosecondes que dure la compression, que la poussée soit transmise directement par les faisceaux laser ou qu'elle soit transmise indirectement par le rayonnement X dans l'enceinte.

Pourquoi un laser Mégajoules

Les lasers les plus puissants à ce jour sont encore très loin de pouvoir créer un point chaud dans le mélange deutérium-tritium ; ils ne permettent donc ni d'en valider le principe, ni d'étudier la propagation d'une onde de combustion thermonucléaire. En revanche, ils ont fait considérablement progresser la connaissance des instabilités hydrodynamiques, de la conversion X, des mouvements de matière sous l'action du rayonnement, etc.

Le laser Mégajoules devrait avoir une énergie suffisante pour déclencher une combustion thermonucléaire dans le milieu fusible. Chauffé et comprimé, ce dernier devrait produire en brûlant une énergie dix fois supérieure à celle qui sera apportée par les faisceaux laser.

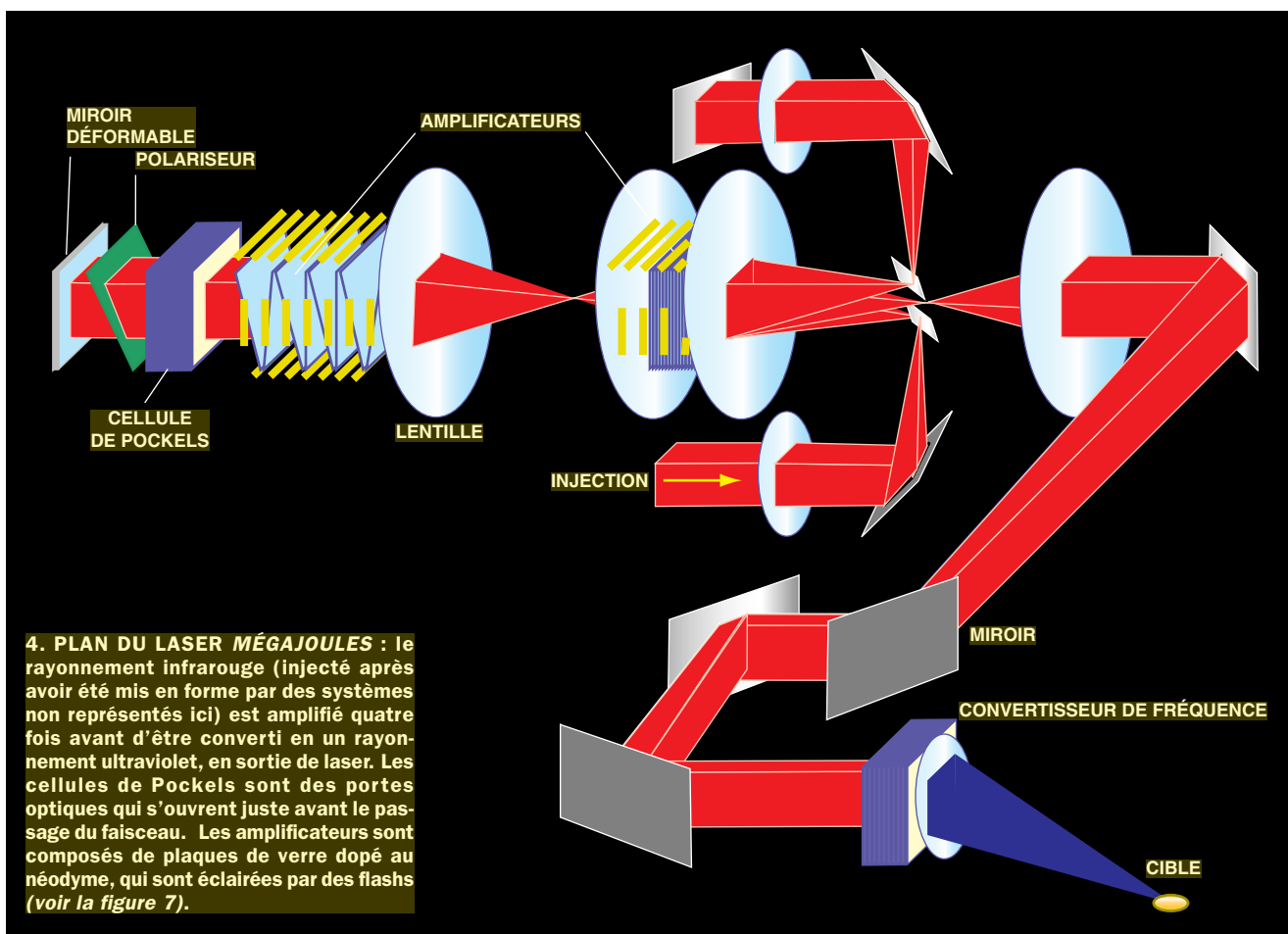
Ce laser fait, depuis longtemps, l'objet d'une collaboration entre le laboratoire de Limeil-Valenton, en France, et le laboratoire Lawrence Livermore, aux États-Unis. Dès la publication des résultats de l'expérience française qui avait obtenu une émission de

neutrons par interaction d'un faisceau laser avec du deutérium solidifié, en 1969, les Américains achetèrent auprès de fabricants français les éléments de leur première installation laser. En contrepartie, les physiciens de Limeil-Valenton purent utiliser, pour la construction du laser *Phébus*, des techniques mises au point à Livermore, pour le laser *Nova*, construit à la même époque. Depuis, la collaboration a été fortement intensifiée autour de la technique des lasers de puissance et des expériences non classifiées. Plusieurs publications internationales sur le «laser X» ont été faites en commun. Un nouvel accord, passé en 1994, couvre les études nécessaires à la préparation du projet français de laser *Mégajoules* et du projet américain *National Ignition Facility* («appareil national d'ignition»). Il est signé pour une durée de dix ans et concerne les études de composants, chaque laboratoire conservant la possibilité de recourir aux industriels de son choix pour les fabrications finales.

Le projet est ambitieux : il s'agit de construire une installation qui pro-

duira assez d'énergie pour obtenir, en attaque indirecte, l'ignition du mélange deutérium-tritium, avec création d'un point chaud et combustion thermonucléaire auto-entretenu. Les modélisations confirmées par les simulations numériques, montrent qu'au voisinage de l'ignition, le gain augmente très rapidement, pour devenir supérieur à un.

À l'aide des outils numériques, une cible de référence théoriquement capable d'atteindre l'ignition a été dimensionnée ; sa sensibilité aux variations des paramètres a été étudiée, et l'on en a déduit les caractéristiques du laser nécessaire. Ce dernier doit être très puissant, pour créer une température suffisante dans l'enceinte, mais ses impulsions doivent être courtes, afin que le plasma créé dans l'enceinte, autour de la capsule, n'atteigne pas la densité critique (quand cette densité est atteinte, les faisceaux laser sont réfléchis) ; enfin la répartition de l'éclairement de la cavité doit être tel que la cible soit attaquée de façon aussi homogène que possible, afin d'éviter le développement des instabilités hydrodynamiques.



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

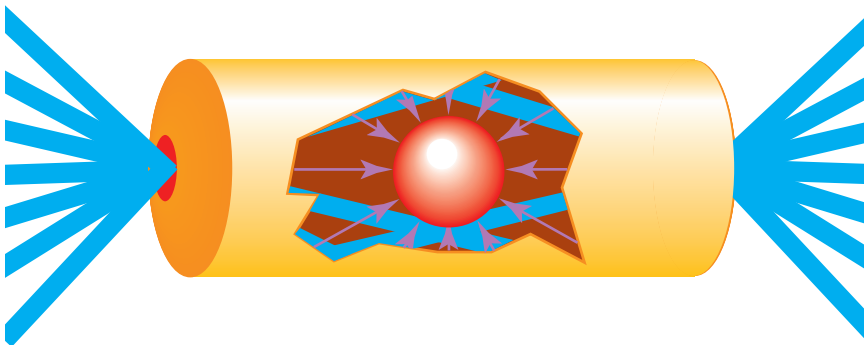
Divers types de lasers ont été employés pour les études de confinement inertiel, mais seul le laser à verre dopé au néodyme a atteint une maturité technique suffisante pour qu'on puisse l'envisager dans le projet *Mégajoules* (ainsi que dans le projet américain). Toutefois, ce laser émet une onde lumineuse 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).