

confinement : l'énergie dégagée serait de quelques dizaines de mégajoules (de quoi chauffer et évaporer quelques litres d'eau).

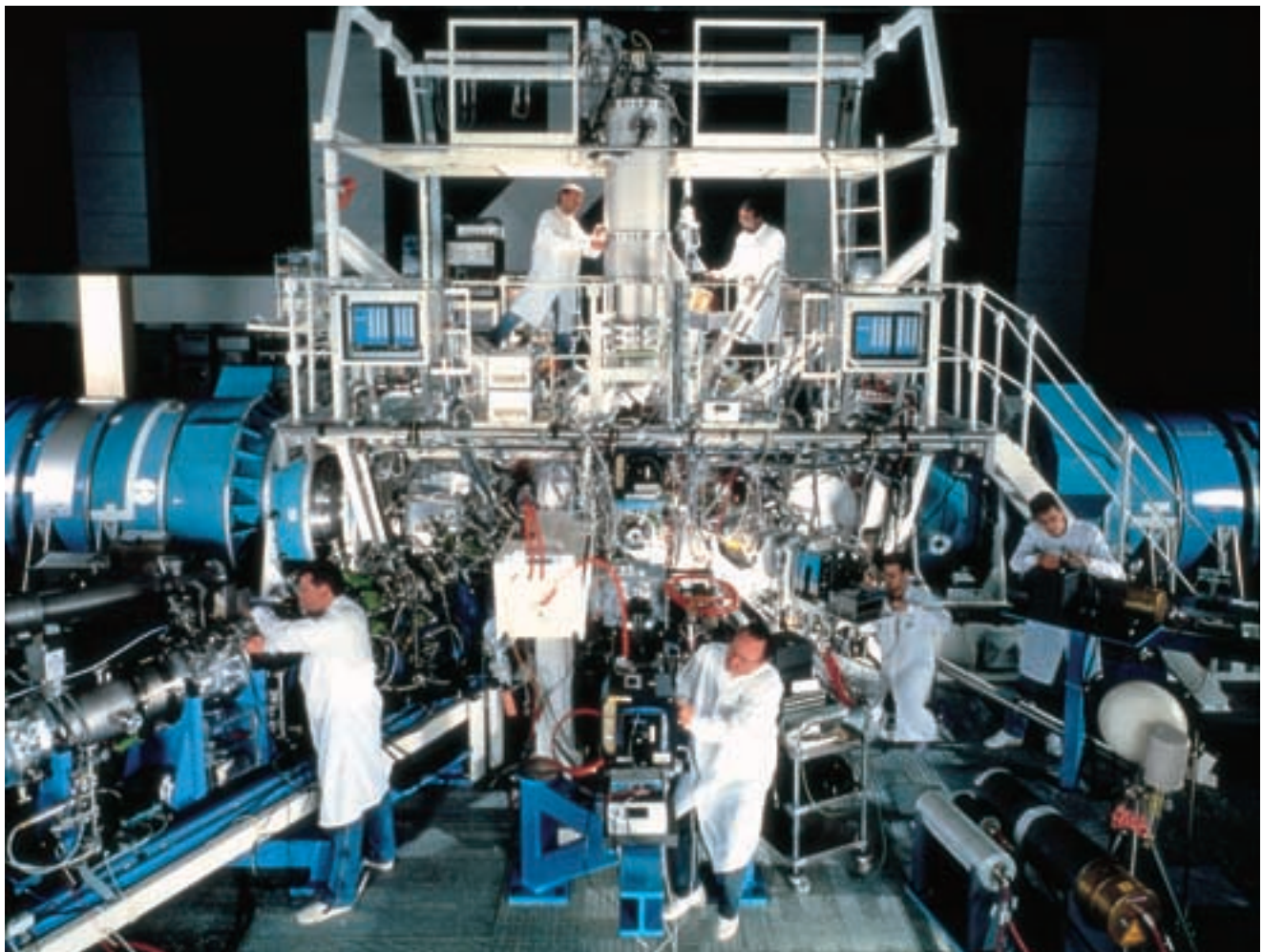
En pratique, le milieu fusible serait un mélange, en proportions égales, de deutérium et de tritium, que l'on emprisonnerait dans une petite capsule sphérique en verre ou en plastique de quelques centaines de micromètres de diamètre et de quelques micromètres d'épaisseur. Dans les expériences effectuées avec les installations existantes, comme le laser *Phébus*, du Centre CEA de Limeil-Valenton, le deutérium et le tritium sont mélangés sous forme gazeuse à une pression de quelques dizaines d'atmosphères. Toutefois, dans les expériences avec le laser *Mégajoules*, le mélange devra être sous forme d'une mince couche solidifiée (par refroidissement, à la température de -250°C) sur la face interne de la capsule et en équilibre avec le gaz de la partie centrale. Le laser éclairera, directement ou

indirectement, comme on le verra plus loin, la surface extérieure de la capsule, de sorte qu'il formera un plasma : les photons seront absorbés par le plasma, et leur énergie sera communiquée aux électrons. Cette absorption sera d'autant plus intense que la densité sera élevée, mais elle sera limitée à une valeur de densité maximale, la densité critique, pour laquelle la fréquence plasma (la fréquence naturelle d'oscillation des électrons) est égale à la fréquence de l'onde électromagnétique : à cette densité, la lumière est réfléchie, de la même façon que les ondes radio sont réfléchies vers la Terre quand elles rencontrent l'ionosphère (au-dessus de l'atmosphère terrestre). La densité critique est inversement proportionnelle au carré de la longueur d'onde du laser, et elle est environ égale à un centième de la densité du solide, pour une longueur d'onde de un micromètre, qui est celle du laser le plus utilisé, le laser à verre dopé au néodyme.

La lutte contre les instabilités

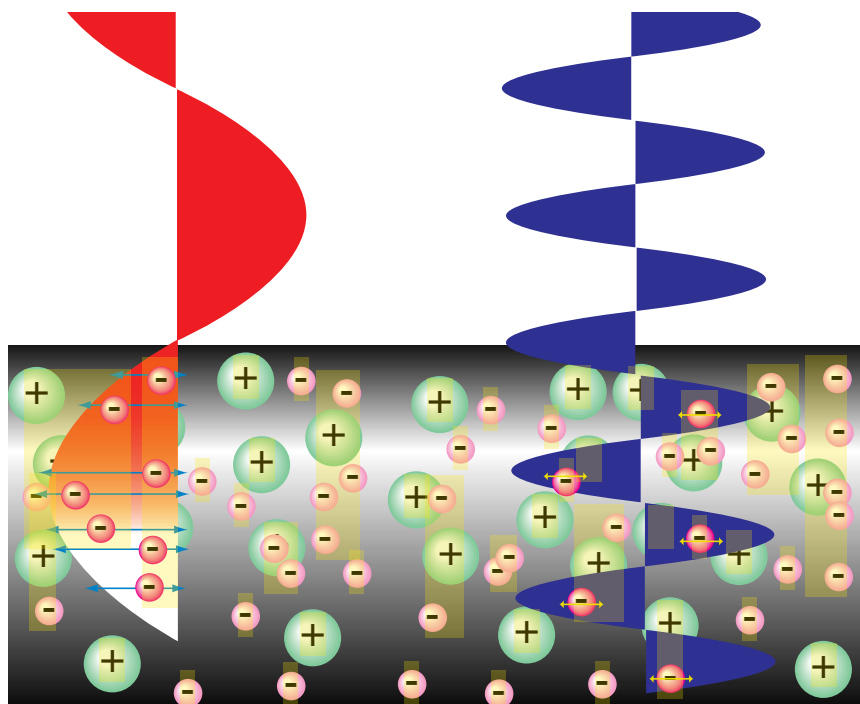
Si la théorie du confinement inertiel est simple, les écueils abondent. Notamment, lorsque la lumière devient très intense, des mécanismes d'instabilités peuvent se déclencher, en raison de couplages entre l'onde électromagnétique incidente et des ondes qui se propagent dans le plasma (ondes de pression, onde plasma ou ondes électromagnétiques). Ces instabilités sont nuisibles, car elles peuvent réduire gravement l'absorption de lumière et créer des particules rapides, qui, venant préchauffer le milieu fusible avant qu'il soit comprimé, s'opposent à cette compression.

Comme ces couplages augmentent avec la longueur d'onde de la lumière, les expériences actuelles n'utilisent pas directement les lasers les plus puissants, qui émettent à une longueur d'onde de un micromètre (dans le



1. LE LASER PHÉBUS, au Centre CEA de Limeil-Valenton, préfigure le laser *Mégajoules*, où l'on cherchera à obtenir la fusion nucléaire. À gauche et à droite, en bas, les deux faisceaux laser qui conver-

gent vers la chambre d'expériences sont à l'intérieur des cylindres bleus. Le cylindre supérieur permet de descendre la cible au centre de la chambre, lors des expériences.



2. LES PLASMAS, comme les métaux, réfléchissent la lumière quand la fréquence de cette dernière est inférieure à la «fréquence plasma». Quand une onde de fréquence faible (à gauche) arrive à la surface d'un plasma, le champ électrique associé à l'onde met en mouvement les électrons à la fréquence de l'onde ; or une charge qui oscille émet une onde à la fréquence de l'oscillation : la lumière est réfléchi. En revanche, quand la fréquence est supérieure à la fréquence plasma (cette fréquence croît avec la densité du plasma), les électrons ne peuvent plus suivre la sollicitation électrique, et l'onde est transmise.

proche infrarouge) : à l'aide de cristaux optiquement actifs, on transforme d'abord leur rayonnement en longueur d'onde de 0,5 micromètre (dans le vert) ou de 0,35 micromètre (dans le proche ultraviolet).

La vaporisation de la partie externe de la capsule a deux effets simultanés. D'une part, la couronne de plasma ainsi formée absorbe l'énergie lumineuse et la transmet vers l'intérieur par conduction thermique. D'autre part, le mélange fusible à l'intérieur de cette capsule est comprimé : comme la matière qui est expulsée de la couronne emporte une quantité de mouvement centrifuge, le reste est projeté vers le centre, avec une quantité de mouvement inverse. Ainsi l'accélération centripète comprime la capsule et chauffe le milieu fusible. Plus cette compression est régulière, meilleure est la performance finale atteinte : le produit de la densité par la température est maximal. D'où la nécessité d'éviter le préchauffage par des particules rapides.

Si la capsule avait une forme initiale parfaitement sphérique, si le laser l'éclairait de façon parfaitement uniforme, la compression maintiendrait la symétrie initiale de la matière. Pour

les théoriciens, cette symétrie est importante, parce qu'elle simplifie l'étude des phénomènes, en les ramenant à une seule dimension.

En réalité, toutefois, la capsule présente de légers défauts de surface et d'épaisseur, et l'éclairement du laser est hétérogène. En outre, les défauts initiaux s'amplifient pendant la compression, d'autant que la capsule est le siège de diverses instabilités hydrodynamiques qui font croître les défauts de façon exponentielle et peuvent conduire à la destruction de l'enveloppe et au mélange du milieu fusible avec le matériau de la capsule.

La plus connue de ces instabilités est celle de Rayleigh-Taylor, qui apparaît lorsque la densité et la pression varient en sens inverse. Cette instabilité apparaît notamment quand on dépose de l'eau sur de l'huile : la pression augmente du haut vers le bas, tandis que la densité varie en sens inverse ; l'instabilité provoque la remontée de l'huile et la chute de l'eau. Les diverses instabilités sont étudiées théoriquement et expérimentalement depuis des années, à l'aide de lasers, mais aussi avec d'autres moyens, tels les canons à gaz ou les explosifs ; les essais nucléaires,

également, ont apporté nombre de renseignements.

Pour chaque type d'instabilité, il existe un seuil de défaut au-dessous duquel elle ne se déclenche pas, une vitesse de croissance et un niveau de saturation. Bien que plusieurs questions ouvertes subsistent, le développement des instabilités est bien compris et, dans de nombreuses expériences, l'accord entre les résultats des mesures et ceux des prévisions théoriques est très satisfaisant. On a ainsi calculé le niveau maximal de défauts initiaux tolérables, tant en ce qui concerne la fabrication de la capsule qu'en ce qui concerne l'éclairement.

Attaque directe ou indirecte ?

Comment éclairer uniformément ? D'une part, on doit utiliser un grand nombre de faisceaux, dont la superposition sur la capsule doit être ajustée avec soin ; d'autre part, à l'intérieur de chaque tache focale, l'éclairement ne doit pas présenter de variations brusques qui seraient dues à des interférences ; enfin, à chaque instant, la puissance de tous les faisceaux laser doit varier exactement de la même façon, afin qu'aucun d'entre eux ne pousse localement plus ou moins que les autres, déclenchant des instabilités hydrodynamiques.

Heureusement la poussée se «lisse» naturellement : l'absorption de la lumière est limitée à la densité critique, inférieure à la densité du bord extérieur de la capsule avant l'ablation. Il existe donc une couche de plasma qui transmet la poussée, mais en la lissant un peu, à la manière d'un oreiller.

Par ailleurs, pour éviter les points chauds dus aux interférences, lesquelles résultent de la cohérence de la lumière laser, de nombreux procédés ont été mis au point. Parmi ces méthodes de «lissage optique», celle qui a été inventée et expérimentée avec succès à Limeil-Valenton consiste à utiliser un laser dont l'émission n'est pas parfaitement monochromatique, de sorte que sa durée de cohérence soit faible.

Cette lumière est envoyée dans une fibre optique de large diamètre : la différence de parcours est grande entre les rayons qui se propagent selon l'axe de la fibre, et les rayons qui subissent de nombreuses ré-