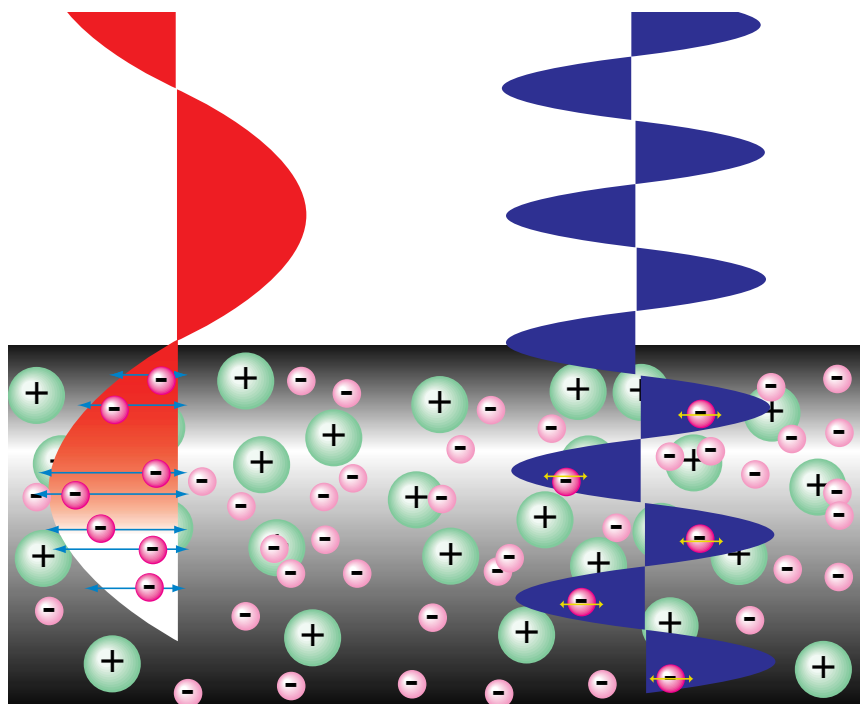




2. LES PLASMAS, comme les métaux, réfléchissent la lumière quand la fréquence de cette dernière est inférieure à la «fréquence plasma». Quand une onde de fréquence faible (à gauche) arrive à la surface d'un plasma, le champ électrique associé à l'onde met en mouvement les électrons à la fréquence de 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-

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

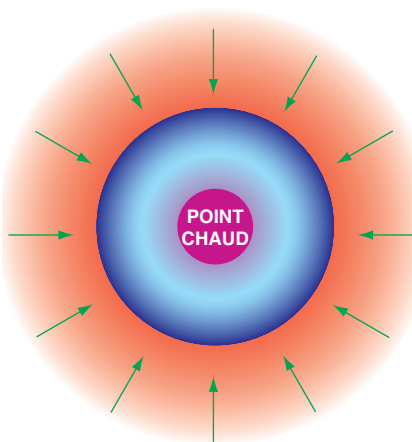
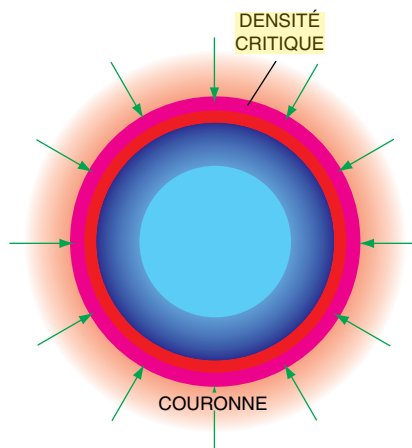
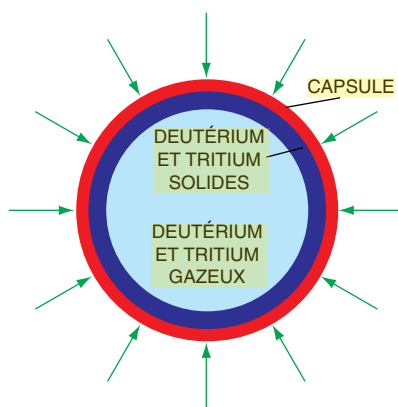
Les simulations sur ordinateur montrent que, pour atteindre un gain suffisant, l'éclairement ne doit pas varier de plus de un pour cent d'un point à un autre de la capsule. C'est une condition redoutable, même si des progrès importants ont été récemment effectués à l'Université de Rochester, avec l'installation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