

Le Laser Mégajoule et la fusion inertielle

Le Laser Mégajoule, en construction en Aquitaine, doit permettre de produire, par réactions de fusion, une énergie supérieure à celle qui est fournie par le laser. De nombreux phénomènes physiques restent encore à maîtriser pour exploiter ce procédé, tels que l'interaction du faisceau laser avec le plasma, les instabilités hydrodynamiques, les équations d'état ou le rayonnement X émis par la matière. Cette physique des plasmas chauds est d'intérêt non seulement pour les programmes de Défense et pour la production d'énergie, mais également pour d'autres disciplines, allant de la métallurgie à l'astrophysique.

Il a été compris dès les années 1960, que l'absorption de flux intenses d'énergie, délivrés pendant des durées courtes, par les lasers de puissance pouvait conduire la matière dans des conditions de densité, de pression et de température gigantesques, rencontrées essentiellement dans les étoiles et les explosions nucléaires. Les scientifiques du CEA se sont intéressés aux lasers de puissance dès leur apparition, et les ont utilisés pour produire les premiers neutrons thermo-nucléaires. Le Laser MégaJoule (LMJ), implanté sur le site du CESTA (Centre d'Etudes Scientifiques et Techniques d'Aquitaine), permettra de franchir le « breakeven », bilan positif entre l'énergie produite par les réactions thermonucléaires et l'énergie fournie à la cible. Cette installation est, d'abord, une des composantes du programme Simulation de la Direction des Applications Militaires. Créer en laboratoire ces plasmas permettra de valider par parties les différentes modélisations numériques utilisées pour la fusion thermonucléaire inertielle. En l'absence d'essais, le LMJ servira donc, indirectement, pour le programme de dissuasion, ainsi que pour la formation des scientifiques qui y travaillent. En outre, les applications du LMJ sont beaucoup plus vastes : cette installation donne accès à la mesure de données physiques de base dans des domaines thermodynamiques extrêmes, et permet de réaliser des situations de dynamiques rapides qui intéressent toute une communauté de sciences (voir encadré 2). C'est pourquoi le LMJ sera une installation « ouverte » à la communauté académique au même titre que son prédécesseur le laser Phebus (situé sur le centre CEA de Limeil-Brévannes et arrêté en 1999).

L'énergie de ce laser (1,8 MJ) a été fixée de façon à pouvoir réaliser la fusion en laboratoire en utilisant le concept de fusion inertielle. A l'inverse de la fusion magnétique qui vise à confiner, par un champ magnétique, un plasma peu dense, l'approche inertielle consiste à comprimer fortement le mélange fusible pendant un temps très court, sans autre confinement que l'inertie propre du système. Des projets de lasers analogues au LMJ sont en développement aux États-Unis (NIF) et au Japon (FIREX), et ces trois projets doivent permettre d'atteindre l'objectif du « breakeven » dans moins de 10 ans.

Différents scénarii pour la fusion par confinement inertielle

Le principe de la fusion inertielle consiste à chauffer et comprimer une cible sphérique, de façon isotrope, soit par rayonnement laser, soit par rayonnement X. L'implosion de la cible crée les conditions de forte densité et température permettant aux réactions de fusion de s'amorcer. La réaction demandant le moins d'énergie est la réaction $D + T \rightarrow He^4 + n$ (voir encadré 1 de l'article précédent). Le schéma de fusion par laser, le plus simple au niveau conceptuel, est désigné sous le vocable d'attaque directe (voir figures 1 et 2). Une intensité laser de l'ordre de 10^{14} à 10^{15} W/cm² est envoyée sur la cible par un grand nombre de faisceaux laser (figure 1a). L'énergie est absorbée par les électrons situés en périphérie ce qui engendre un plasma de température 2-3 keV (1 keV = 10 millions °K), et donc une pression (dite d'ablation) très élevée de l'ordre de quelques

Article proposé par :

Claude Chenais-Popovics, claudio.chenais-popovics@polytechnique.fr; Laboratoire pour l'utilisation des lasers intenses, CNRS/Ecole polytechnique.

Daniel Vanderhaegen, daniel.vanderhaegen@cea.fr, CEA.

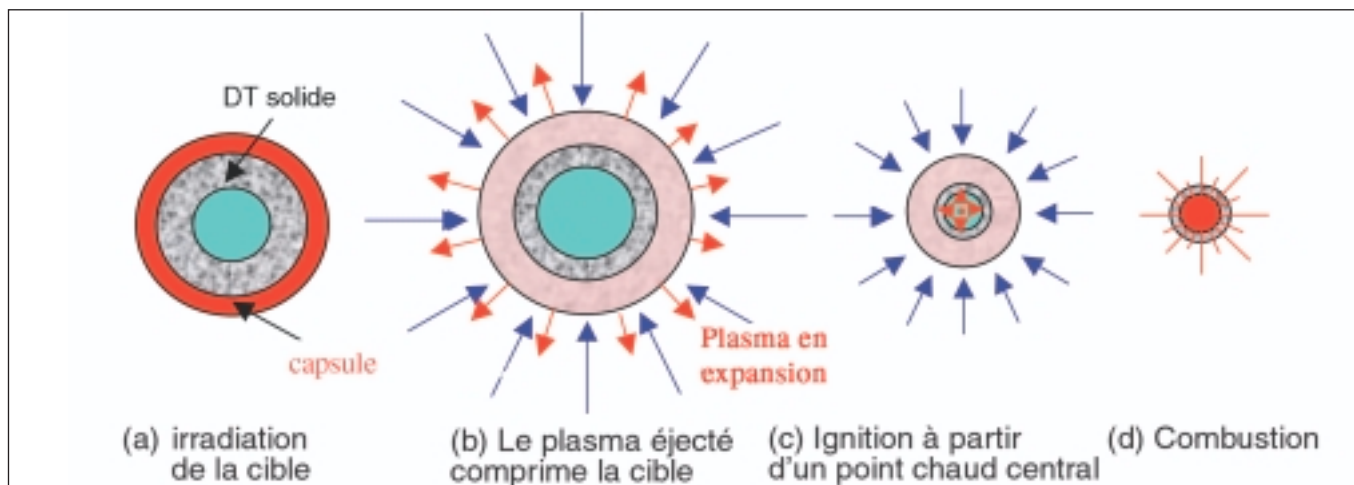


Figure 1 - Allumage et combustion du mélange combustible dans le schéma de fusion inertielle.

centaines de MBars. Le plasma se détend vers l'extérieur de la cible, et par réaction ou effet fusée, il engendre un choc, qui accélère la cible, de façon centripète (figure 1b). La cible implose, l'énergie cinétique se transformant en énergie interne ; le matériau fusible se comprime et chauffe jusqu'à des températures de 5-10 keV au centre : les réactions de fusion se déclenchent (figure 1c). Celles-ci vont s'entretenir et la combustion se propage sous forme d'une onde de détonation, si les conditions d'allumage sont réunies : l'énergie apportée, essentiellement par les particules α issues de la réaction DT, doit parvenir à compenser les pertes par rayonnement et par conduction électronique. Le combustible brûle alors tant que le système ne se disloque pas (figure 1d), et la durée du confinement inertiel dépend essentiellement du produit ρR , produit de la masse volumique ρ par le rayon R de la sphère de combustible comprimé.

Dans ce schéma, on utilise la zone centrale comme une allumette pour enflammer le reste du DT. Ce principe, appelé « allumage par point chaud », a un avantage certain par rapport à l'allumage dans tout le volume : la masse portée aux conditions d'allumage est plus faible (donnée par $T = 5 \text{ keV}$ et $\rho R = 0,2 - 0,3 \text{ cm}^{-2}$ pour le point chaud) et l'énergie nécessaire également. Si l'on fixe les conditions d'allumage, la masse de DT à mettre en condition est inversement proportionnelle au carré de la densité, d'où l'intérêt d'une densité initiale élevée et l'idée d'utiliser du DT solide cryogénique. La structure la plus simple serait de remplir la cible de DT solide. Mais l'énergie interne cédée au DT par l'implosion est proportionnelle au volume initial V du DT, car elle est essentiellement due au travail PV de la pression d'ablation. On a donc intérêt à maximiser le volume total de la cible pour une masse donnée, en utilisant une structure en coquille (voir figure 1a).

Les énergies mises en jeu conduisent à des vitesses d'implosion de l'ordre de $3-4 \cdot 10^7 \text{ cm/s}$ et à des durées d'implosion de l'ordre de la dizaine de nanosecondes. L'implosion est réalisée par une succession de chocs faibles dont la chronométrie est finement ajustée, par la mise en forme tempo-

relle de l'impulsion laser, pour ne pas conduire à une production d'entropie trop élevée, nuisant à la compression. Ceci étant fixé, au moment de l'allumage, on aboutit au centre à une structure quasi-isobare entre le DT central, chaud et peu dense (représentant 1/20 de la masse totale de quelques centaines de microgrammes) et le DT extérieur très dense (jusqu'à 1000 fois la densité solide) et froid.

Le fonctionnement décrit ci-dessus suppose dans tous les cas, une irradiation parfaitement isotrope. Dans un schéma d'attaque directe, ceci impose un grand nombre de faisceaux laser, parfaitement équilibrés en puissance, précisément « pointés » et synchronisés, faute de quoi le point chaud ne sera pas sphérique et l'ignition échouera. Une autre manière d'assurer une bonne isotropie est de recourir au schéma de l'attaque indirecte (figure 2), considéré comme le scénario nominal pour le LMJ, comme pour le NIF. Celui-ci consiste à irradier, avec les faisceaux laser, une cavité métallique (en or habituellement) de quelques millimètres, appelée « hohlraum ». L'énergie déposée est convertie en rayonnement X qui s'homogénéise en re-circulant à l'intérieur de la cavité. Elle se comporte alors comme un four chauffé à une température radiative de 250 à 350 eV qui émet un rayonnement X, quasi-planckien. Ce rayonnement attaque alors la cap-

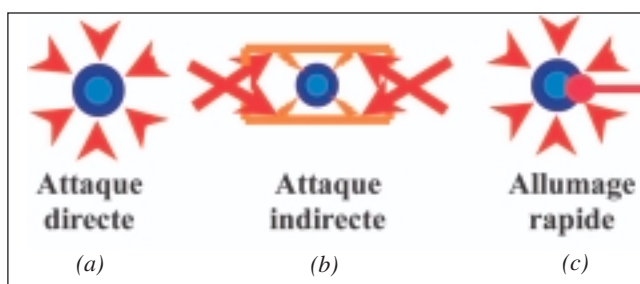


Figure 2 - Schémas d'implosion : (a) : attaque directe d'un micro-ballon rempli de mélange DT ; les faisceaux sont directement focalisés sur le micro-ballon ; (b) : attaque indirecte : l'énergie laser est convertie en rayonnement X qui éclaire uniformément le microballon rempli de DT ; (c) : allumage rapide : un laser de ultra-haute intensité pénètre dans le plasma créé par implosion d'un micro-ballon pour produire un point chaud.

Encadré 1

L'installation Laser Mégajoule

L'installation a été dimensionnée pour répondre à un large éventail de besoins, l'objectif principal étant l'allumage et la combustion du mélange DT. Compte tenu des marges prises en compte, l'énergie laser est fixée à 1,8 MJ et la puissance crête à 550 TW. Pour des raisons de coût de développement et de maîtrise des technologies, le choix s'est porté sur le laser à verre dopé au néodyme de longueur d'onde 1,05 μm , converti à plus courte longueur d'onde (351 nm). L'importance d'utiliser des longueurs d'onde courtes (ou des fréquences élevées), démontrée dans les années 1980, est fondée sur l'optimisation du dépôt d'énergie laser. En effet, à plus courte longueur d'onde, l'énergie est déposée à plus forte densité, plus au coeur de la cible, et elle est mieux couplée au plasma. Pour la conversion de fréquence, on utilise des cristaux de KDP (dihydrogène-phosphate de potassium), dans lesquels un couplage non-linéaire d'ondes permet de convertir 50 % de l'énergie laser dans l'harmonique 3, à la longueur d'onde 351 nm. Pour atteindre l'énergie requise, le système laser sera composé de 240 faisceaux de forme carrée de $40 \times 40 \text{ cm}^2$ (regroupés par quatre en 60 quadruplets), chacun devant produire 7,5 kJ à la longueur d'onde de 351 nm, soit 15 kJ dans l'infra-rouge, avant triplage de fréquence. Le laser devra être capable de fournir des impulsions mises en forme temporellement de durée 20 ns (le maximum de puissance étant délivré pendant 3 à 5 ns). Afin d'assurer une bonne implosion de la cible, la précision de synchronisation entre les faisceaux doit être de 15 ps et la précision de pointage de 50 μm , pour une tache focale de $600 \times 1200 \mu\text{m}^2$ (au meilleur foyer).

La chaîne laser comprend trois sous ensembles principaux représentés sur la figure :

le pilote : destiné à créer l'impulsion laser initiale, à la mettre en forme spatialement et temporellement et à la pré-amplifier à un niveau d'énergie de l'ordre du joule. Le lissage temporel s'effectue aussi au niveau du pilote.

la section amplificatrice : l'énergie issue du pilote est amplifiée jusqu'au niveau de 15 à 20 kJ grâce à un quadruple passage de chaque faisceau à travers 18 plaques de verre dopé au Néodyme, pompées par flashes. Le quadruple passage permet d'extraire un maximum d'énergie des amplificateurs, et améliore le rendement total du dispositif.

le transport et la conversion en fréquence : les faisceaux amplifiés sont transportés sur plus de 40 m vers le hall d'expériences et ensuite convertis dans l'ultraviolet, avant d'être focalisés sur cible par réseaux optiques, qui éliminent également le résidu de lumière à la fréquence fondamentale du laser et son harmonique 2. Ce système de focalisation est une des originalités du laser LMJ.

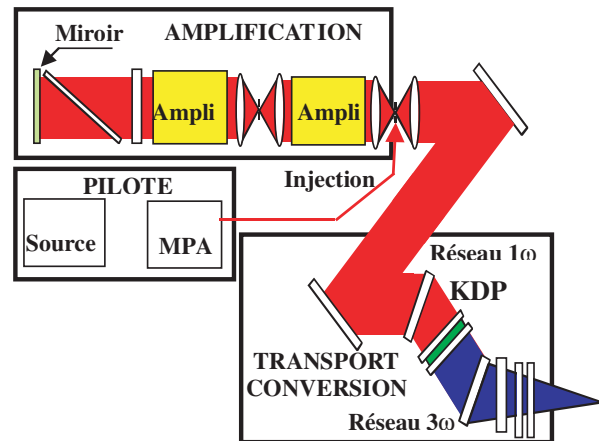


Figure - Schéma de la chaîne laser LMJ. La source (cadre « pilote ») est préamplifiée puis effectue plusieurs passages dans les amplificateurs (cadre « amplification »). L'énergie infrarouge est convertie en vert et UV dans un cristal de KDP, puis focalisée sur cible par un système de réseaux (cadre « transport et conversion »). Une lame anti-débris protège le hublot d'entrée dans la chambre à vide.

Les chaînes laser convergent vers la chambre d'expérience de 10 m de diamètre, qui abrite la cible, d'un rayon de quelques millimètres, et supporte les différents diagnostics ; ceux-ci permettront de mesurer les caractéristiques des plasmas obtenus au cours des tirs. L'ensemble représente un bâtiment de 300 m sur 150 m, la salle d'expérience elle-même couvrant un diamètre de 60 m sur une hauteur de 40 m.

Ces spécifications font du LMJ le plus grand instrument d'optique jamais imaginé : environ 10 000 grandes pièces optiques de 0,5 à 1 m de côté, de très grande précision et exposées à un flux laser élevé ; compte tenu de l'ampleur du projet, les études sont effectuées en collaboration avec le projet américain NIF, très semblable. La Ligne d'Intégration Laser (LIL) a été construite dans un bâtiment spécifique, pour servir de prototype au LMJ ; elle permet de valider les choix ci-dessus et d'identifier les points durs. Les équipes du CEA ont ainsi obtenu avec un faisceau : 17 kJ dans l'infra-rouge, et 7,5 kJ en 5 ns dans l'ultra-violet, conformément aux spécifications et aux prévisions du code d'optique permettant de simuler la propagation des faisceaux dans les différents éléments de la chaîne laser. Le premier quadruplet est maintenant en activité et permet la réalisation des premières expériences de physique. Quatre faisceaux supplémentaires viendront s'ajouter ensuite. Le chantier du bâtiment LMJ a été lancé en 2003, il devrait s'achever en 2007, le laser devant être opérationnel en 2010.

sule de DT et l'implose avec une bonne isotropie. On obtient également des pressions d'ablation plus élevées qu'en attaque directe, à condition de remplacer le DT externe par une couche de matériau « ablateur » adapté ; ceci permet d'envisager des cibles de dimensions plus petites implosant plus rapidement. Par rapport à l'attaque

directe, le rendement de conversion du rayonnement laser en rayonnement X diminue l'efficacité du processus, mais le gain important en symétrie d'implosion et la taille réduite des cibles, avantageuse vis-à-vis des instabilités hydrodynamiques, compense cette perte de rendement.

Suite au développement des lasers Ultra Haute Intensité (UHI), sub-picoseconde, de puissance PetaWatt (10^{15} W), un autre schéma est apparu, l'allumage rapide (figure 2). Il consiste à découpler la phase d'implosion et la création du point chaud : on réalise une compression uniforme en densité (dite isochore) et l'on apporte l'énergie au point chaud, alors décentré, par des particules relativistes qui chauffent localement le DT lors de leur ralentissement. Celles-ci sont issues de l'interaction d'un laser UHI, à des flux supérieurs à $1\,020\text{ W/cm}^2$, soit à travers un cône évidé dans la capsule, soit à travers le canal creusé par un premier laser UHI. Ce type de schéma permet de relâcher les contraintes de symétrie de l'implosion et peut conduire à des gains (rapport de l'énergie thermonucléaire à l'énergie laser) de l'ordre de 100 voire supérieur, contre 10-20 pour l'attaque directe et un peu plus pour l'attaque indirecte. Le projet japonais FIREX explore cette voie prometteuse.

La démonstration du « breakheaven » s'appuie sur le schéma d'attaque indirecte. Par contre, pour les réacteurs du futur, on pourrait envisager d'utiliser le schéma d'attaque directe, avec des lasers pompés par diode, à l'étude actuellement, ou de remplacer les faisceaux laser par des faisceaux d'ion lourds qui ont un meilleur rendement énergétique, mais ne sont pas encore suffisamment focalisables. Il faudra également surmonter les défis technologiques associés à la fabrication des cibles à haute cadence et à la récupération de l'énergie de fusion produite ; différents concepts existent et certaines recherches sont mutualisées avec la fusion magnétique.

Physique de l'interaction laser-cible

L'absorption de l'énergie laser dans une cavité, ou dans la capsule en irradiation directe, est diminuée par la présence d'instabilités « plasma » qui provoquent une rétrodiffusion de la lumière laser. Cette diffusion est due à un couplage résonnant, non linéaire, entre l'onde laser et les ondes excitées dans le plasma (électronique ou ionique, pour les instabilités Raman, ou Brillouin, respectivement). Les faisceaux se fragmentent en filaments de lumière au cours de leur propagation, ce qui peut provoquer une inhomogénéité d'irradiation et une déflexion des faisceaux. C'est en attaque indirecte que le niveau d'instabilité est le plus haut, du fait de la longueur de propagation des faisceaux dans le hohlraum. En effet, pour limiter la détente du plasma d'or créé sur les parois de la cavité, on remplit celle-ci d'un mélange gazeux H/He, qui forme un plasma uniforme favorable au déclenchement des instabilités. La figure 3 montre la propagation d'un filament et illustre le problème de déflexion des faisceaux. Celle-ci peut atteindre quelques degrés et conduire à une erreur de pointage des faisceaux de l'ordre de quelques centaines de microns, non négligeable devant les dimensions caractéristiques du hohlraum. La filamentation, et son incidence sur le taux de diffusion Brillouin et Raman font l'objet de nombreuses études. En

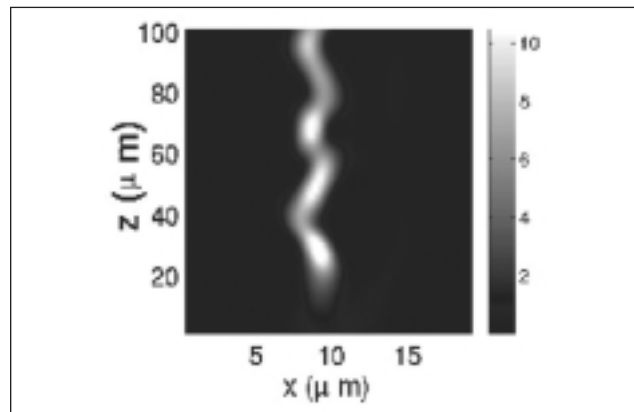


Figure 3 - Simulation bidimensionnelle de la propagation d'un filament de lumière laser dans un plasma. (réf : Pierre Michel, et al., *Phys. of Plasmas* 10, 9 (2003)).

particulier, la mise en oeuvre d'un lissage optique des faisceaux laser inhibe le couplage résonnant et limite la croissance de ces instabilités, en introduisant des fluctuations spatio-temporelles sur les faisceaux. Un niveau de rétrodiffusion de l'ordre de 5 à 10 % est ainsi attendu sur les implosions en attaque indirecte, avec un laser mégajoule.

Dans le cas de l'irradiation indirecte, l'énergie doit non seulement être absorbée, mais doit être convertie en rayons X avec un bon rendement. La conversion X dans un hohlraum est connue de façon assez précise, dans le cas où le laser est triplé en fréquence, comme l'étaient les lasers PHEBUS et NOVA, en France et aux USA. Le rendement de conversion, prévu de l'ordre de 70 % pour les cibles LMJ et NIF, est un paramètre essentiel pour de bonnes conditions d'implosion. Il dépend du transport d'énergie dans le plasma formé sur les parois du hohlraum en or, tant par conduction de chaleur électronique, que par transport de rayonnement. La physique atomique du plasma, et en particulier l'ionisation du plasma modifient son comportement et régissent le transfert radiatif. Les coefficients d'absorption X et XUV de la coquille et de la cavité doivent donc être connus assez précisément car ils déterminent l'absorption d'énergie dans la coquille, et dans le combustible.

L'uniformité d'éclairement est importante car elle règle la symétrie d'implosion, clé de la maîtrise des instabilités hydrodynamiques de grandes longueurs d'onde qui détruisent l'implosion, en introduisant des défauts graves dans la convergence de la matière. Cette symétrie est pour sa part assez bien maîtrisée, pour l'irradiation indirecte. Pour l'irradiation directe, une uniformité d'éclairement à moins de 1 % près constitue l'élément le plus critique. Les instabilités hydrodynamiques, liées à un défaut d'éclairement ou un défaut d'épaisseur de la coquille, ou encore, pour les plus petites longueurs d'onde, aux rugosités d'interface de la capsule, interviennent pendant deux phases de l'implosion, comme le montre la figure 4. Les instabilités sont du type Rayleigh-Taylor ou Richtmeyer-Meshkov et résultent du fait que, dans un milieu en accélération (ou décélération),

Encadré 2

Physique des plasmas chauds et applications

Plusieurs domaines de la physique bénéficient des avancées technologiques et scientifiques réalisées avec le développement de la fusion inertielle par laser. La physique fondamentale des plasmas chauds en est une des principales bénéficiaires ; par exemple, dans l'étude de la dynamique d'ionisation des plasmas, la validation de codes numériques de physique atomique s'appuie actuellement sur des expériences bien instrumentées permettant de mesurer les paramètres du plasma par diffusion Thomson, en même temps que le spectre X d'un élément lourd tel que le xénon. L'étude des plasmas très denses est également menée avec des lasers de puissance. Son développement s'oriente vers les plasmas « tièdes et denses », présentant une température de l'ordre de 10 eV et une densité proche du solide. Ces plasmas corrélés et proches d'états dégénérés produits dans la phase de compression en fusion inertielle sont aussi présents dans les étoiles. Ils n'ont été encore que très peu étudiés expérimentalement, car difficiles à réaliser. Enfin, la production de particules très énergétiques par impact d'une cible solide ou gazeuse par un laser subpicoseconde de puissance ouvre la possibilité d'étudier des interactions avec les noyaux, en présence de champs et de plasmas.

La physique des matériaux sous choc est peut-être une des retombées la plus en aval des lasers de puissance, impliquant des collaborations avec l'industrie automobile et aéronautique qui s'intéresse, par exemple, au durcissement des matériaux et au décapage d'ailes d'avions. La rupture dynamique de métaux soumis à un choc peut être étudiée en focalisant un faisceau laser sur une feuille métallique. La figure montre le cratère produit par l'éjection d'une écaille arrachée de la surface libre d'une feuille de fer, irradiée avec un faisceau du laser LULI 2000, (longueur d'onde 1.06 μm , durée d'impulsion 4 ns) focalisé sur une surface de 3 mm de diamètre, sur la face opposée à la face photographiée. L'utilisation d'un laser plus puissant doit permettre de traiter de plus grandes surfaces, en conservant les processus métallurgiques déjà étudiés. Ce type de chocs a aussi des applications en géologie : l'irradiation par un laser peut produire des pressions similaires à celles engendrées par l'impact d'une météorite sur Terre, et conduire à des structures post-choc comparables à

celles des roches que l'on trouve dans les cratères créés par choc de météorite.

L'astrophysique est un domaine de prédilection pour l'application des expériences de physique des plasmas. En effet, l'équation d'état de matière interne aux planètes, comme Jupiter, ou Saturne, est encore mal connue. Un effort particulier est fourni actuellement pour préciser l'équation d'état de l'hydrogène et de l'eau, constituants très répandus dans le système solaire. Les coefficients d'absorption de la matière chaude sont aussi l'objet d'études qui peuvent être appuyées par des expériences laser. Ces coefficients régissent le transport d'énergie radiative. Par exemple, les oscillations du soleil dépendent fortement de la façon dont l'énergie est transportée depuis l'intérieur du soleil vers ses couches externes. Enfin, des expériences laser permettent, moyennant des lois d'échelle de simuler des phénomènes astrophysiques tels que l'explosion d'une supernova ou la collision de plasmas en présence de champ magnétique.

Enfin, les sources de particules et de rayons X produites dans les plasmas créés par laser, et en particulier avec une impulsion subpicoseconde, trouvent une grande variété d'applications potentielles, en biologie, médecine ou physique nucléaire. La brièveté de ces sources en fait un élément clé dans des expériences « pompe-sonde » où la dynamique d'un événement rapide peut être étudiée. Le rayonnement X et les particules, en particulier les protons, sont déjà utilisés en imagerie et traitement médicaux. La possibilité d'utiliser un laser comme source de rayons X ou protons ouvre des perspectives intéressantes. La réalisation de source de petite taille permet, par exemple, d'envisager une mammographie de précision capable de détecter des tumeurs à un stade très précoce. Ces applications médicales ou biologiques mettent en jeu des installations de laser de puissance, beaucoup plus petites que pour un laser mégajoule, qui bénéficient de la technologie avancée nécessaire aux très grandes installations.

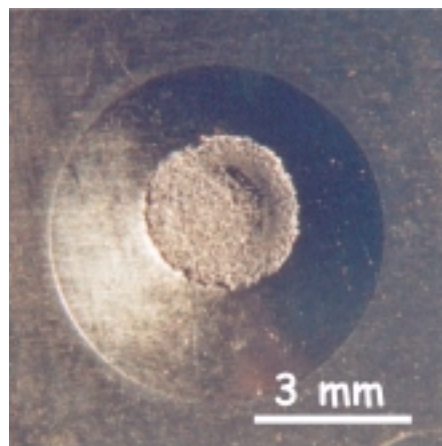


Figure - Cratère produit par l'éjection d'une écaille arrachée de la surface libre d'une feuille de fer d'épaisseur 400 μm , irradiée avec un faisceau du laser LULI 2000, (longueur d'onde 1.06 μm , durée d'impulsion 4 ns) focalisé sur une surface de 3 mm de diamètre, sur la face opposée à la face photographiée. (réf : Equipe « Chocs dans les solides », Laboratoire de Combustion et de Détonique (UPR CNRS 9028), Futuroscope.)

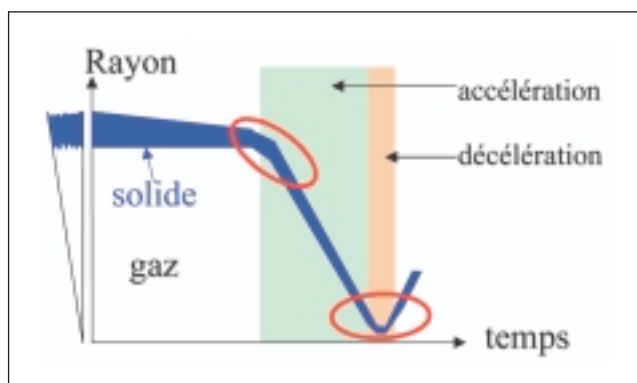


Figure 4 - Instabilités hydrodynamiques au cours de l'implosion d'un microballon rempli de DT. Les zones instables sont entourées le long de la courbe représentant la position de la coquille en fonction du temps. Les phases d'accélération et décélération de la coquille sont grisées. A gauche est représenté un secteur de la cible initiale.

l'interface entre une couche d'élément lourd poussant une couche d'élément léger est instable. On les observe communément quand on superpose un liquide lourd sur un liquide léger. Le liquide lourd pénètre dans le liquide léger, sous forme d'aiguilles et le liquide léger forme des sortes de champignons, détruisant la régularité de l'interface. Dans une implosion, une première instabilité intervient dans la phase initiale, sur le front d'ablation qui pousse vers l'extérieur de la coquille. Cette instabilité peut ne pas rompre la coquille si celle-ci est assez épaisse. Il faut alors plus d'énergie pour arriver à chauffer le point chaud, d'où doivent partir les réactions nucléaires. L'instabilité la plus dangereuse prend naissance plus tard, dans la phase de décélération, à l'interface entre le point chaud et le combustible froid. La convergence de la coquille est alors très forte, et amplifie les irrégularités de l'interface. L'uniformité d'éclairement de la capsule, et la maîtrise de sa rugosité sont donc des points importants à contrôler.

Des études, relevant de la physique fondamentale, restent nécessaires pour obtenir une implosion optimisée. Connaître les équations d'état et les coefficients d'absorption de la matière chaude et dense constitue un des axes de recherche actuels. Il reste aussi à bien comprendre les conditions de déclenchement des instabilités, instabilités hydrodynamiques qui peuvent détruire la symétrie d'implosion, ou instabilités plasma qui modifient l'absorption d'énergie laser.

Pour en savoir plus

La fusion thermonucléaire inertielle, ed. R. Dautray et J.P. Watteau, Eyrolles, Paris, 1993.

NAKAI (S.), MIMA (K.), Laser driven inertial fusion energy : present and prospective, *Rep. Prog. Phys.* 67,321, 2004.

Lindl (J.D.), The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the National Ignition Facility, *Phys. Plasmas* 11, 339, 2004.

Inertial fusion sciences and applications, State of the art, ed. K.A. Tanaka, D.D. Meyerhofer, J. Meyer-Ter-Vehn, Elsevier, France, 2002.

Conclusions et perspectives

Bien qu'il ait été conçu, au départ, pour les besoins de la Défense, le Laser MégaJoule joue un rôle stimulant pour le développement des lasers de puissance, et la physique des plasmas chauds. D'une part, les avancées technologiques nécessaires à la mise en place de l'installation sont utilisées par la communauté académique, quand elles ne sont pas développées en amont par les chercheurs eux-mêmes. D'autre part, une collaboration étroite s'est nouée entre la communauté académique et les ingénieurs CEA, stimulée par les jeunes ingénieurs formés dans les laboratoires universitaires et/ou soutenus par le CNRS. On peut ainsi envisager une utilisation rationnelle du temps de faisceau qui sera ouvert à la communauté scientifique. Cette communauté est regroupée autour de l'Institut Lasers et Plasmas (ILP) nouvellement créé pour fédérer les efforts académiques autour de la fusion et l'interaction laser/plasma, stimuler la formation des jeunes, et enfin coordonner l'accès de la communauté aux installations du LMJ, et de son prototype, la Ligne d'Intégration Laser (LIL). L'ILP participe à la définition d'une partie des installations, comme, par exemple, l'implantation d'un faisceau multi-pétawatt, picoseconde, couplé à la LIL.

Enfin, le développement des installations laser de puissance plus petites, comme au LULI (Laboratoire pour l'Utilisation des Lasers Intenses) et au LOA (Laboratoire d'Optique Appliquée), à Palaiseau, ainsi qu'au CELIA (Centre d'Études des Lasers Intenses) à Bordeaux, permet de poursuivre une recherche fondamentale en physique des plasmas et des lasers, comme l'étude des plasmas denses, de la dynamique d'ionisation des plasmas, de la production et du transport d'électrons et de particules, et des effets plasma sur la structure interne des noyaux. Ces installations, plus flexibles, permettent également de préparer des expériences qui seront réalisées ensuite à pleine puissance sur les lasers de la gamme mégajoule dont les cadences de tirs sont nécessairement plus faibles. Ces recherches peuvent aussi déboucher sur des applications importantes, avec des retombées industrielles comme, entre autres, le développement des lasers de puissance pompés par diodes, et le traitement des matériaux par choc laser.