

Le laser de grande puissance au service de la recherche *

par M.H. Key et C.L.S. Lewis,
(Département des sciences physiques pures et appliquées, Queen's University, Belfast)

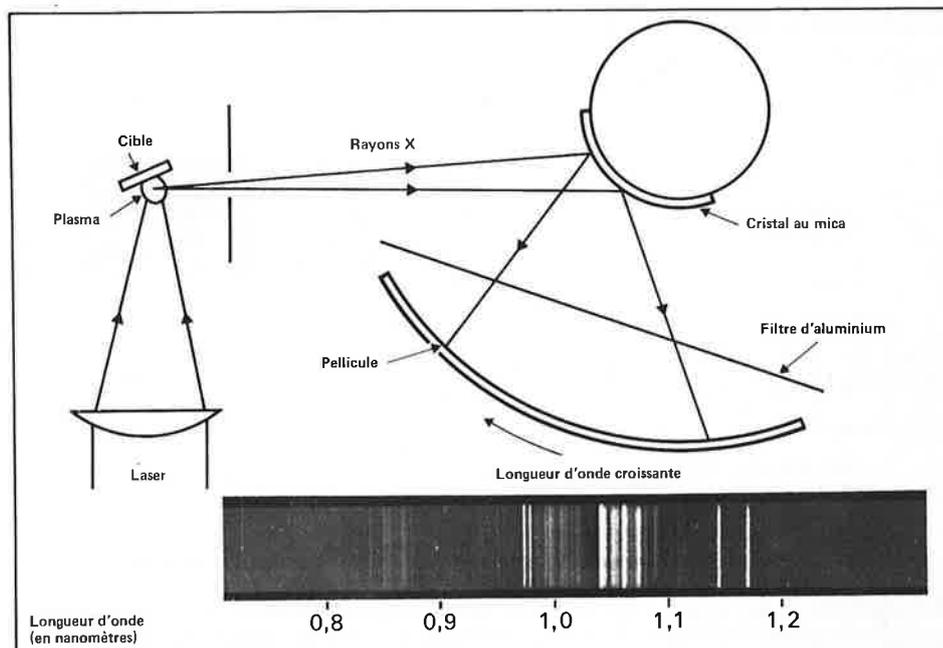
Depuis l'invention du laser, on a noté un important surcroît d'activité dans le large secteur de la recherche portant sur les interactions, à haute intensité, entre les ondes lumineuses et la matière. A présent, dans le monde entier, l'intérêt se concentre essentiellement sur l'irradiation de cibles pleines à l'aide de faisceaux laser verre-néodyme de haute puissance. On sait, en effet, que le maximum de puissance obtenu, jusqu'à présent, à partir d'un laser a été fourni par les lasers à néodyme. Il est possible qu'on leur préfère d'autres types dans l'avenir, soit pour des motifs d'ordre technologique, soit pour des raisons ayant trait à la longueur d'onde ou à la durée des impulsions. Cet article traite essentiellement des lasers verre-néodyme et des progrès qui ont précédé la création du nouveau laboratoire du Royaume-Uni, le Science Research Council Laser Centre (Centre des lasers du Conseil pour la Recherche Scientifique).

Lorsqu'un faisceau laser d'une puissance de plusieurs gigawatts converge sur un point, distant d'environ 100 microns, d'une surface plane d'un objectif plein, celui-ci libère des électrons à la surface. Ces électrons libres peuvent alors absorber l'énergie provenant de l'impulsion du laser. Au fur et à mesure que la quantité d'énergie absorbée augmente, la température des électrons devient de plus en plus élevée de

sorte qu'un nombre accru d'électrons se trouvent arrachés aux atomes sous l'effet des collisions. Les ions formés sont alors portés à haute température sous l'effet des collisions avec les électrons et l'on obtient éventuellement un "plasma produit par laser". Du fait de sa pression et de sa température élevées, le plasma qui n'est pas confiné explose. Ceci se produit soit avant soit après la fin de l'impulsion laser selon la durée de cette impulsion. La durée typique de l'explosion du plasma est de 0,1 à 1 ns (nanoseconde) de sorte que dans le cas de l'interaction des impulsions laser les plus courtes, dont la durée est de l'ordre de 10 ps (picosecondes) pour le verre-néodyme, il est possible de considérer séparément l'absorption de l'énergie laser et les phénomènes hydrodynamiques subséquents à la dilatation du plasma. Par contre, une impulsion plus longue, d'une durée de 1 à 10 ns, réagit avec le plasma en cours de dilatation et un jet de plasma émerge d'un microcratère croissant qui se développe dans la cible. C'est donc un phénomène hydrodynamique plus complexe.

La fusion thermonucléaire

On sait fort bien depuis quelques années que la fusion thermonucléaire contrôlée à l'aide de lasers à haute puissance est réalisable théoriquement. Ceci reviendrait essentiellement à irradier des objectifs sphériques de 100 microns contenant du deutérium et du tritium et à produire de ce fait la compression et l'implosion radiales conduisant à plus de 1 000 fois la densité du solide. L'énergie calorifique de choc



Dans le spectromètre à cristal au mica incurvé, les rayons X provenant du plasma produit par le laser sont réfléchis sur une pellicule et l'angle d'incidence auquel la réflexion se produit dépend de la longueur d'onde. Dans cet exemple, le spectre ainsi produit montre les raies provenant d'une cible de cuivre.

* De Spectrum 147

produite porte la température à environ 10^8 K, qui est la température d'ignition du "brûlage" thermonucléaire. En mettant en forme l'impulsion laser, il est possible d'accroître la pression dans le plasma entourant la boulette cible de manière à réaliser la compression maximale du noyau. De nombreux pays financent des projets portant sur l'étude de la fusion induite par le laser à la place des programmes plus classiques de confinement magnétique.

De nombreux groupes de chercheurs, possédant des systèmes de puissance moyenne (des dizaines de gigawatts en impulsions de 10 ps à 10 ns), ont fait, depuis plusieurs années, des études portant sur les plasmas produits par le laser.

Ces plasmas ne sont pas comprimés de la manière décrite ci-dessus, mais leur étude a permis d'établir les caractéristiques physiques fondamentales de l'interaction entre le laser et la matière et de développer de nouvelles techniques de diagnostic indispensables pour l'examen de tels plasmas transitoires, de très petite dimension à très haute température. Étant donné que les plasmas produits par les lasers mesurent généralement moins de 100 microns, qu'ils durent une nanoseconde ou moins, et qu'ils constituent des sources de rayonnement très intenses, il est possible d'extraire une grande quantité d'informations sur le laser en faisant appel aux procédés spectroscopiques.

La caméra à sténopé de radiographie est probablement l'outil le plus simple mais le plus puissant. En plaçant un petit sténopé entre le plasma et la pellicule radiographique, il est possible d'obtenir une résolution spatiale de quelques microns. C'est de cette manière que l'on a obtenu la première preuve de la compression sphérique lorsque l'image radiographique du plasma a indiqué un point très chaud bien net provenant du noyau comprimé.

De nouvelles raies spectrales

Les lasers d'une puissance supérieure à 10 GW (gigawatts) peuvent chauffer des cibles dont le nombre atomique est élevé (éléments lourds) jusqu'à des températures de 10^6 à 10^7 K, températures auxquelles il est possible de faire perdre aux atomes jusqu'à 40 % de leurs électrons périphériques. Un grand nombre d'espèces d'ions se prêtent donc à l'étude spectroscopique et des travaux sont en cours dans la région des rayons X du spectre pour lesquels on utilise des spectromètres à incidence rasante et des radiodiffractomètres. On a pu établir la classification de nombreuses raies spectrales nouvelles qu'il n'aurait pas été possible autrement d'observer en laboratoire.

L'appareil de radiocristallographie par filage, mis au point dernièrement pour l'étude des plasmas produits par laser, donne un temps de résolution allant jusqu'à seulement 20 ps et même moins. L'appareil de radiocristallographie par filage est un système électro-optique : les photons des rayons X frappant une photocathode d'or éjectent des électrons qui se trouvent rapidement accélérés jusqu'à atteindre une vitesse élevée et qui sont ensuite concentrés sur un écran à substance luminescente qui émet des photons visibles sous l'effet du choc des électrons. Si les électrons se trouvent déviés en cours de route, le temps d'arrivée des photons de rayons X initiaux se manifeste par un déplacement sur l'écran. Un renforceur d'image améliore la qualité de l'image. L'appareil de radiocristallographie par filage peut être employé avec d'autres appareils pour lesquels l'information obtenue jusqu'à maintenant se limitait à la moyenne de différents résultats. La photocathode de l'appareil de radiocristallographie par filage peut remplacer, par exemple,

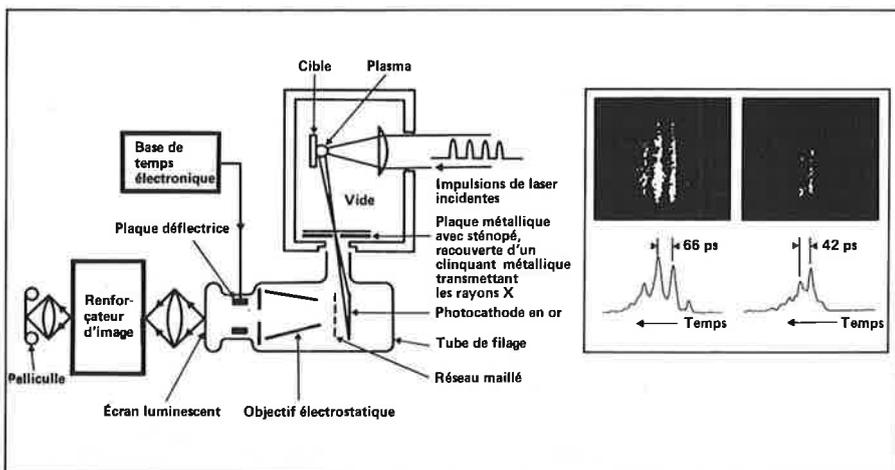
la pellicule radiographique de la caméra à sténopé pour donner des images avec résolution spatiale dans une dimension, et résolution dans le temps jusqu'à seulement quelques picosecondes dans l'autre.

Parmi les autres méthodes, citons l'interférométrie qui fait appel à un faisceau laser divisé selon deux trajectoires dont l'une passe par le plasma avant de rejoindre l'autre. Les effets pelliculaires obtenus par les deux faisceaux déphasés produisent des données sur les variations de densité dans le plasma étant donné que l'indice de réfraction et donc la trajectoire optique dépendent de la densité. La dispersion des faisceaux laser de sondage fournit également des renseignements concernant la température et la densité des électrons avec une certaine mesure de résolution spatiale. L'inconvénient de ces techniques est lié au fait que le rayonnement électromagnétique se trouve réfléchi lorsqu'il atteint des régions du plasma à la "densité critique". (C'est le même phénomène qui se produit lorsque les ondes radio-électriques se trouvent réfléchies par l'ionosphère.)

La technologie du laser

La possibilité de produire la fusion thermonucléaire grâce au laser a naturellement encouragé les efforts visant à la construction de lasers à haute température. Un laser à verre néodyme à haute puissance se compose généralement d'un générateur d'impulsions de type laser (l'oscillateur) et d'une série d'amplificateurs de diamètre croissant. Malheureusement, il n'est pas possible de continuer à augmenter indéfiniment la puissance du laser de cette manière. Même si l'on augmente la surface du faisceau du laser de manière à maintenir un flux à puissance constante et à éviter les dégâts occasionnés aux surfaces de verre par le laser, d'autres facteurs interviennent.

La réfraction non linéaire dans le verre de laser peut être considérée comme résultant de l'affaiblissement des liaisons entre les électrons et l'atome dans le verre lorsque les liaisons se trouvent étirées jusqu'au point critique par le champ électrique de l'onde lumineuse du laser. Ceci suppose que les atomes puissent être polarisés davantage aux hautes intensités, ceci ayant pour effet d'accroître l'indice de réfraction. De ce fait, si un point intense commence à se développer dans le faisceau du laser, les rayons sont réfractés vers la région d'intensité supérieure. Le faisceau risque de se "décomposer" en formant des filaments instables. L'étude mathématique du problème montre que, dans une chaîne d'amplificateurs de laser, le produit de la longueur du verre et de l'intensité ne doit pas excéder un maximum fixé, sous peine d'entraîner la décomposition. Il s'ensuit qu'il n'est pas possible de continuer à ajouter des amplificateurs de surface de plus en plus grands pour une intensité constante. Il faut réduire l'intensité et c'est alors qu'intervient une loi du rendement non proportionnel qui impose à la puissance d'un faisceau unique une limite pratique de l'ordre de 1 TW (terawatt) pour un diamètre



La caméra de filage de rayons X mis au point dernièrement permet un temps de résolution de 20 picosecondes et même moins. Les rayons X provenant du plasma tombent sur une photocathode en or, éjectant des électrons qui se trouvent accélérés et concentrés sur un écran luminescent. Une tension à base de temps appliquée à deux plaques situées à l'intérieur du tube de filage dévie les électrons en cours de trajectoire de sorte que le moment d'arrivée des photons des rayons X initiaux se manifeste par un déplacement sur l'écran. Des photons visibles émis par l'écran passent par un renforceur d'image et l'image est enregistrée sur pellicule. On peut voir à droite des traces typiques obtenues lors de l'irradiation d'une cible par un train d'impulsions de laser mesurées en picosecondes.

de faisceau de 15 cm. Cet idéal a été réalisé pour la première fois dans un seul appareil expérimental existant aux États-Unis, le *Cyclops*. Il est possible d'obtenir une puissance de plus de 1 TW en divisant le laser de manière à former un grand nombre de faisceaux identiques en parallèle. C'est là le principe qui explique la construction du laser *Shiva* de 20 TW à 20 faisceaux aux États-Unis et en URSS d'un laser à 9 faisceaux, et qui doit éventuellement en compter 57.

Les systèmes de laser à faisceaux multiples facilitent l'irradiation systématique des boulettes sphériques pour les expériences de compression; KMS Fusion Inc, aux États-Unis, a fait la première démonstration de compression à l'aide d'un faisceau relativement simple à deux rayons d'une puissance d'environ 200 GW. Au Royaume-Uni, plusieurs groupes universitaires comme ceux de Belfast, de Hull et de Essex ainsi que ceux du Centre de la direction de l'énergie atomique au Royaume-Uni (UKAEA) à Culham possèdent des lasers à faisceau simple dont la puissance se mesure en dizaines de gigawatts en impulsions se mesurant en nanosecondes, soit environ 100 GW en impulsions de picosecondes. D'autres efforts visant à la réalisation de lasers à haute puissance sont en cours en France, en Allemagne et au Japon.

Le nouveau Centre du laser

Les groupes universitaires sont trop petits pour entreprendre des expériences de compression, c'est pourquoi, il a été décidé de construire un centre du laser au Rutherford Laboratory avec le financement du Conseil de la recherche scientifique (Science Research Council). Bien que ce centre ne soit pas conçu pour réaliser la fusion, il est suffisamment grand pour permettre aux scientifiques du Royaume-Uni de contribuer aux recherches visant à accroître la somme des connaissances que l'on possède sur les plasmas dont la densité est supérieure à la moyenne. Le laser à grande puissance sera également employé dans des domaines connexes de la recherche scientifique.

La construction du Centre va se dérouler en deux phases. La première phase porte sur un système amplificateur à barres de verre néodyme capable de fournir 100 GW tandis que la seconde phase incorporera un arrangement à double faisceaux avec amplificateurs à disques et barres. Lorsqu'il entrera complètement en service en 1977, l'étage excitateur fournira un faisceau de 60 GW qui sera divisé en deux en vue de l'amplification ultérieure dans l'étage à deux faisceaux. La puissance de sortie nominale totale des deux faisceaux est de 800 GW dans une impulsion de 300 ps.

Les premières expériences du Centre étudieront les interactions entre le laser et la matière dans les régions de 10^{15} à 10^{16} W/cm² de cibles planes. On ne comprend pas vraiment à fond les inter-

actions qui se produisent à cette densité de puissance alors même que les modèles de fusion théoriques sont basés sur cette plage. Aux densités de puissances incidentes supérieures à 10^{14} W/cm², des phénomènes non linéaires commencent à se produire du fait du couplage des ondes du plasma avec le vecteur électrique du faisceau du laser. Ils peuvent aboutir à une absorption efficace de l'énergie du laser. Toutefois, d'autres effets non linéaires risquent de réduire l'absorption du fait de la contre-diffusion stimulée du rayonnement incident.

Les premières expériences sur les instabilités de contre-diffusion ne semblent pas confirmer les prédictions théoriques de coefficients de réflexion élevés. L'absorption efficace de l'énergie est indispensable pour la fusion au moyen du laser, aussi faut-il mieux comprendre ces phénomènes.

L'autre problème concerne le transfert d'énergie à l'intérieur même du plasma et à des flux de ce genre les phénomènes de conduction thermique ne sont pas classiques du fait que les courbes de température concernent des distances comparables aux trajectoires moyennes des électrons libres. La conduction de chaleur constitue le principal véhicule dans les systèmes de compression théoriques, aussi faut-il procéder à de bonnes expériences concernant les phénomènes de transport à la fois de chaleur et de rayonnement.

Les systèmes de compression idéaux pourraient échouer de toutes sortes de façons. Le plasma en cours d'implosion pourrait manifester des instabilités d'accélération tout comme le thé possédant une "stabilité" idéale se désintègre dans une tasse de thé renversée, la compression échouerait alors et les jets de plasma se trouveraient expulsés hors de la matière en implosion. Les courants thermo-électriques peuvent produire de très grands champs magnétiques qui déforment énormément les déplacements des particules de plasma chargées. La réduction anormale de la conduction thermique risque d'empêcher la chaleur de se trouver conduite jusque dans la cible et de donner lieu à la formation d'ions rapides. L'absorption liée à l'instabilité risque de produire des flux d'électrons pénétrants qui traversent toute la cible pleine et "préchauffent" le noyau, empêchant ainsi la compression adiabatique. Tous ces phénomènes sont nouveaux.

Des compressions centrées

Les expériences avec deux faisceaux porteront sur l'irradiation en sens opposés de coquilles creuses ou de boulettes sphériques, des dispositifs optiques spéciaux concentrant des ondes lumineuses en provenance de toutes les directions. Il est peut-être possible d'atteindre des compressions de l'ordre de 100 avec la puissance de laser de 0,8 TW dont on dispose. L'amélioration des conditions susceptibles de permettre la compression maximale risque

d'impliquer l'emploi de cibles composites où l'énergie est absorbée par les atomes d'impuretés des coquilles extérieures, et d'impulsions de laser conformées optimisant la variation de pression en fonction du temps. Les scientifiques n'ont pas été à même, jusqu'à maintenant, d'étudier les caractéristiques physiques de la matière comprimée à de telles densités.

Les plasmas produits par le laser en provenance de telles cibles sont des sources de rayon X efficaces et les applications potentielles de ces sources sont nombreuses. On a déjà mesuré des taux d'efficacité de conversion de l'énergie du laser en rayons X, égaux à 20 % et les lasers à puissance devraient fournir des sources capables de produire jusqu'à 100 GW de rayons X mous.

Les sources de rayon X intenses peuvent trouver des applications en radiographie. Un laser à courte longueur d'onde résultera peut-être des plasmas produits par le laser, aussi verra-t-on des expériences dans ce domaine au Centre du laser. L'une des méthodes proposées pour résoudre le problème consiste à utiliser une source de rayons X d'un plasma produit par le laser pour irradier un matériau de manière à produire la photo-ionisation des électrons K internes, ce qui revient à radiographier l'action du laser. Une autre méthode d'approche consisterait à créer un plasma d'ions hydrogène totalement ionisés dont le taux de dilatation hydrodynamique est plus rapide que le taux de recombinaison des électrons.

Pour de tels systèmes, il sera sans doute nécessaire d'utiliser un objectif cylindrique pour la mise au point du faisceau laser de manière à obtenir une longueur efficace du véhicule d'amplification des ondes lumineuses. Partout dans le monde, des recherches se poursuivent dans ce domaine car une source de rayons X cohérente trouverait de nombreuses applications dans le domaine de la médecine, de la cristallographie et de la spectroscopie ainsi que dans la physique des plasmas où elle fournirait un nouvel outil de diagnostic.

Ce sont là quelques-uns seulement des domaines de recherche auxquels on pense dans l'immédiat; pour d'autres comme, par exemple, les interactions nucléaires dans les plasmas comprimés et les phénomènes électro-dynamiques des quanta, il faudra attendre de posséder des lasers encore plus puissants. La nécessité de faire appel à une puissance laser de plus en plus élevée ainsi que de disposer de lasers à haute efficacité stimule le développement d'autres systèmes de laser ainsi que la recherche portant sur de nouvelles transitions susceptibles de remplacer éventuellement le laser à verre néodyme. Des travaux de ce genre trouveront également une place dans le nouveau laboratoire où une source de pompage de faisceau d'électrons à haute puissance sera sans doute installée au cours de la seconde phase de développement.