

Cette technique, d'abord apparue en Grande-Bretagne en 1964, fut ensuite étudiée en Union soviétique et aux États-Unis. La puissance résultante était alors limitée, ce qui lui donnait peu de chances dans la course à la fusion. Du coup, on l'utilisait surtout pour tester, en laboratoire, les effets des rayonnements nucléaires sur les composants des systèmes d'armes.

Depuis le début des programmes de recherche sur la fusion inertielle, en 1973, les physiciens ont considérablement progressé dans l'obtention des hautes puissances et dans les connaissances des conditions de l'ignition, par laser ou par rayonnement X pulsé. Les analyses de décennies d'expériences effectuées à l'aide de lasers puissants ont guidé la mise au point des capsules thermonucléaires. Aujourd'hui, les simulations

à l'aide de superordinateurs montrent qu'il faut deux millions de joules, durant quatre nanosecondes, soit presque 500 térawatts, pour allumer le combustible.

Les lasers peuvent atteindre ces paramètres : après 13 ans de recherches avec le laser Nova, dont l'énergie est de 30 kilojoules, le Laboratoire Lawrence Livermore construit un nouveau laser beaucoup plus puissant, le NIF (l'acronyme de *National Ignition Facility*, soit «Installation nationale pour l'ignition»). S'il fonctionne comme prévu, le NIF récupérera au moins autant d'énergie de fusion que le laser apportera d'énergie électromagnétique à la cible. Ce remarquable résultat sera toutefois insuffisant, car l'énergie libérée par le laser restera 100 fois inférieure à l'énergie utilisée pour le faire fonctionner. Autrement dit, le NIF sera la prochaine

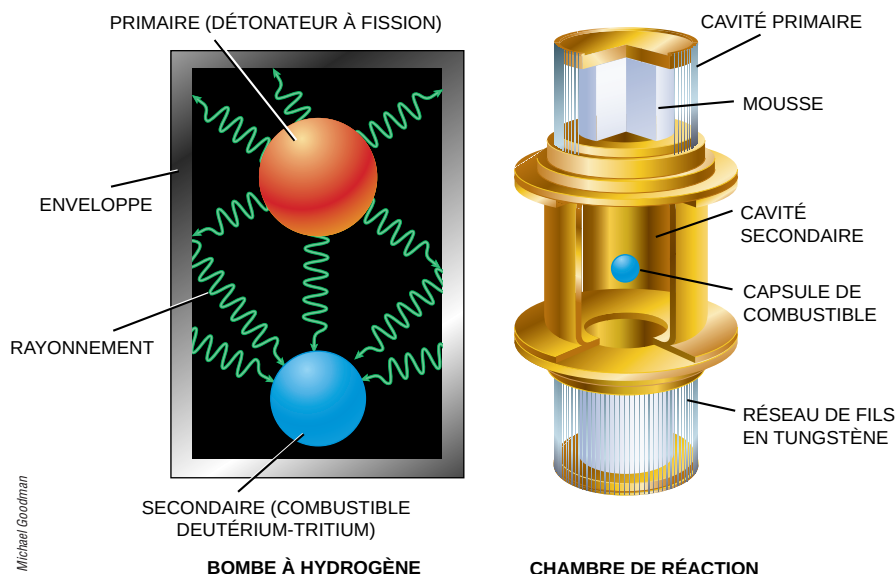
étape vers les rendements élevés, mais il ne sera pas le prototype du système de fusion nucléaire contrôlée.

Renaissance de la striction

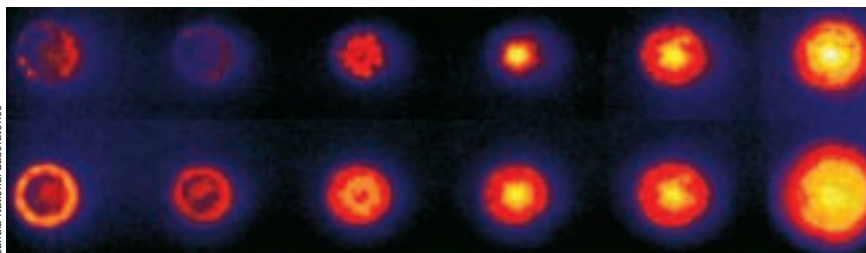
Il y a seulement quelques années, le système à hautes puissances pulsées des Laboratoires *Sandia* restait très insuffisant, de sorte que nous avons hésité à prolonger nos études. Notre persévérance fut récompensée : la puissance engendrée a crû considérablement. Alors que dans les années 1960, la puissance pulsée ne fournissait qu'un millième de térawatts de rayonnement, nous avons récemment produit 290 térawatts de puissance rayonnée avec le générateur Z. Nous prévoyons d'obtenir prochainement la fusion à gain élevé avec des impulsions de rayonnement X de 1 000 térawatts.

Nous avons également amélioré la focalisation du rayonnement X sur la petite cible contenant le combustible. Dans les années 1970, notre système chauffait la cible par l'intermédiaire de faisceaux d'électrons ; puis, dans les années 1980, nous avons remplacé les électrons par des ions légers, afin d'obtenir des températures supérieures. Cependant, on focalise difficilement les ions légers vers une cible. Les rayons X, en principe, sont plus intéressants : ils remplissent uniformément l'espace autour de la capsule, de la même manière que la chaleur d'un four enveloppe un poulet en train de rôtir. L'étude de la fusion à l'aide d'une petite chambre de réaction où l'on libère de puissantes bouffées de rayons X a été récemment mise en œuvre grâce à une technique ancienne : la striction magnétique axiale.

L'idée de cette technique date des années 1950. En ces débuts de la recherche sur le confinement magnétique, des physiciens avaient pensé déclencher la fusion en faisant passer un courant électrique très intense dans du deutérium gazeux. Le courant devait ioniser le gaz et engendrer un champ magnétique qui «pincerait» le plasma résultant, créant de fortes densités et des températures élevées selon l'axe du courant (on nomme cette technique *Z-pinch* en anglais, car l'axe du courant est l'axe *z*). À l'époque, la technique ne comprimait pas le plasma de manière uniforme : des instabilités divisaient le plasma en paquets insuffisamment chauffés. La compression du plasma engendrait jusqu'à 1 000 électronvolts, sous la forme de rayons X. Pendant 30



2. LA FUSION PAR CONFINEMENT INERTIEL utilise le principe de la bombe H (à gauche) : le rayonnement d'une bombe à fission (détonateur) comprime et chauffe le combustible – du deutérium et du tritium – contenu dans la cavité (secondaire). De même, les chambres de confinement inertiel (à droite) permettent d'immerger symétriquement la capsule, de la taille d'un grain de poivre, dans le rayonnement issu du détonateur. Lorsque l'énergie est concentrée sur la capsule, celle-ci implose symétriquement.



3. DES RAYONS X sont produits quand le plasma issu de la vaporisation d'un grand nombre de fils de tungstène implose sur une fibre en deutérium et en carbone, disposée sur l'axe d'une machine à striction. Ici on a représenté les étapes successives de cette implosion vue de dessus, à intervalles de trois nanosecondes. La série d'images supérieure correspond à des rayons X d'énergie supérieure à 800 électronvolts, celle du bas est obtenue avec des rayons X de 200 électronvolts.

ans, les physiciens utilisèrent la striction pour des expériences de durcissement, c'est-à-dire pour tester l'influence des radiations nucléaires sur les matériaux et les circuits électroniques des armes nucléaires.

Aujourd'hui, la striction axiale renaît, parce qu'elle semble être un bon système de déclenchement de la fusion inertielle. Dans les trois dernières années, nous avons montré qu'en combinant l'efficacité et le coût peu élevé de la puissance pulsée rapide avec la simplicité et l'efficacité de la striction axiale comme source de rayonnement X, nous pouvions atteindre l'ignition avec des rayons X d'énergie inférieure à un kiloélectronvolt, qui comprime- raient une cible d'hydrogène. De sur- croît, l'accessibilité d'une source de puissance pulsée de rayons X doit per- mettre d'aller plus loin, c'est-à-dire jus- qu'à la fusion efficace du combustible, avec un rendement élevé.

Pour déclencher la fusion, la stric- tion doit se dérouler dans une chambre de réaction, ou cavité, qui piège les rayons X. Dans une configuration que nous avons testée, la striction s'effectue dans une cavité primaire, et le com- bustible est placé dans une cavité secon- daire, plus petite. Dans une autre configuration, la capsule de combus- tible est dans une mousse en matière plastique, au centre de la cavité primaire. Les rayons X produits lors de la stric- tion du plasma baignent uniformément la capsule, de la même façon que l'en- veloppe d'une bombe H piège le rayon- nement provenant de la bombe A. Des expériences entreprises depuis trois ans ont montré que les deux configurations doivent fonctionner, car nous savons maintenant créer une striction uniforme et stable suffisamment longtemps pour obtenir l'efficacité requise.

Le secret de la réussite

Pourquoi avons-nous tant progressé ces trois dernières années? Parce que nous avons mieux compris les instabi- lités. Thomas Edison essaya un mil- lier de matériaux avant de trouver le secret de l'ampoule électrique ; de même, nous avons finalement décou- vert que l'instabilité qui rend la stric- tion axiale inefficace peut être réduite si les bouffées X sont très brèves.

L'instabilité qui détruit la symé- trie du pincement est analogue à celle qui fait descendre irrégulièrement au fond d'un bol une couche de vinaigre

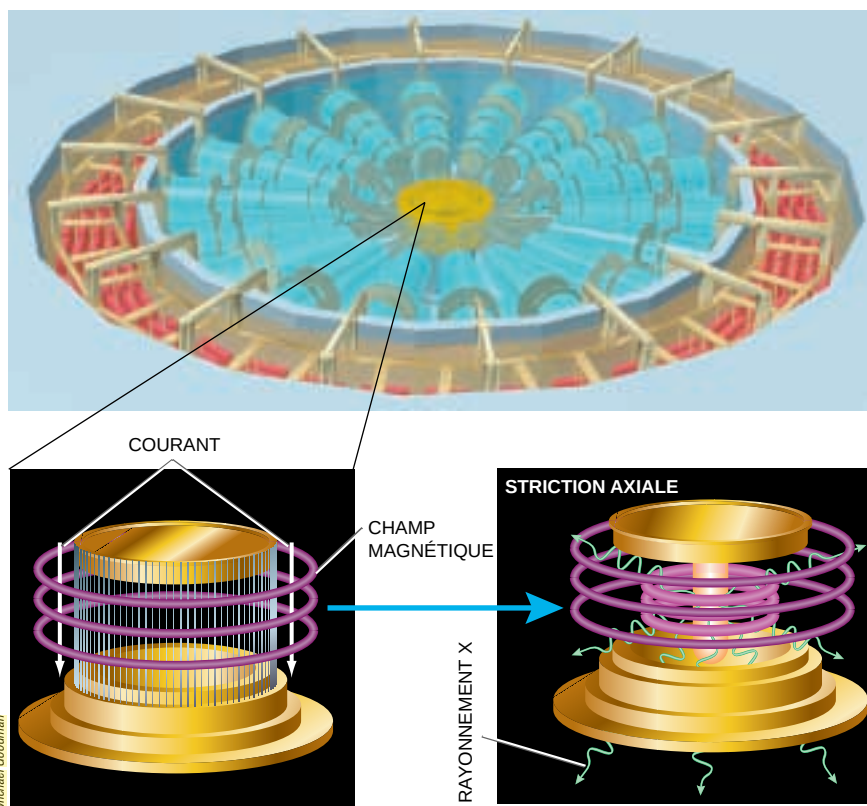
soigneusement déposée sur de l'huile. Elle gêne la fusion, mais des simula- tions numériques ont montré que, plus le plasma initial est uniforme, plus la striction est régulière le long de l'axe du champ magnétique, lors de la pro- duction du rayonnement X.

Les tentatives d'uniformisation du plasma ont rencontré peu de succès jusqu'à la mise au point, en 1995, d'une chambre de réaction munie de fils d'aluminium, puis de 400 minces fils de tungstène. La striction axiale avec des fils avait déjà été utilisée à la fin des années 1970 : la Société *Physics Inter- national* avait employé cette configu- ration afin d'augmenter l'énergie du rayonnement X résultant de un à cinq kiloélectronvolts. Toutefois, les géné- rateurs de courant d'alors ne pouvaient fournir suffisamment de puissance électrique pour assurer l'implosion d'un grand nombre de fils.

Aujourd'hui les générateurs pro- duisent suffisamment de courant.

Quelle est la succession des opérations? L'impulsion de courant, dont la durée est de 100 nanosecondes, «vaporise» d'abord les fils qui se transforment en un plasma. Ces fils individuels coales- cent en un tube de plasma. Puis, à mesure que le courant continue d'aug- menter, le tube de plasma se com- prime violemment en un plasma cylindrique uniforme. Des expériences ont montré que la cavité cylindrique située le long de l'axe z est chauffée lorsque le plasma est ainsi comprimé. De surcroît, contrairement à ce qu'in- diquaient les simulations, des expé- riences à l'Université Cornell ont montré que chaque fil ne devient pas instanta- nément un plasma, mais qu'un cœur métallique froid demeure au centre du fil, entouré par un plasma. Ainsi, le cou- rant continue de circuler, ce qui accroît l'efficacité de la striction.

Les premiers tests de ces idées s'ef- fectuaient, il y a trois ans, auprès du générateur SATURN, qui fournit un



4. DANS UN DISPOSITIF À HAUTE TENSION PULSÉE, la concentration de la puissance débute avec l'allumage d'un dispositif circulaire de 36 générateurs de Marx, où une source de haute tension (90 kilovolts) charge une batterie de condensateurs de 5 000 mètres cubes en deux minutes. Les impulsions électriques des 36 générateurs passent dans des condensateurs intermédiaires, isolés par de l'eau pure. La durée des impulsions y est réduite à 100 nano- secondes. Traversant un gaz interrupteur commandé par laser, les 36 impulsions sont syn- chronisées à moins d'une nanoseconde près. L'impulsion résultante est transférée au dispositif à fils (*en bas, à gauche*), via 4 lignes de transmission isolées magnétiquement pour minimi- ser les pertes en énergie. Lorsque les fils, dont le diamètre est égal au dixième de celui d'un cheveu, sont parcourus par des courants dont l'intensité atteint plusieurs milliers d'am- pères, la striction magnétique du plasma se produit (*en bas, à droite*).