

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

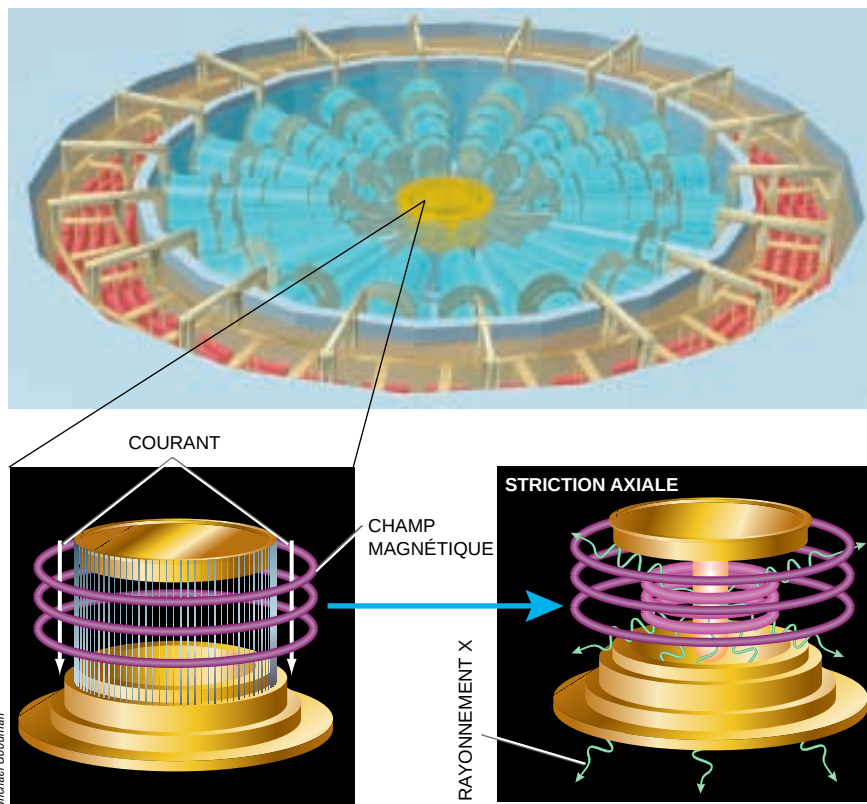
soigneusement déposée sur de l'huile. Elle gêne la fusion, mais des simula- tions numériques ont montré que, plus le plasma initial est uniforme, plus la striction est régulière le long de l'axe du champ magnétique, lors de la pro- duction du rayonnement X.

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*).

Le projet SYRINX

Au Centre d'études de Gramat (CEG), dans le Lot, la Délégation générale pour l'armement (DGA) met au point des générateurs de puissance en vue de concevoir des sources intenses de rayonnement X par striction magnétique axiale de plasma (*Z-pinch*). Les ingénieurs français explorent des voies innovantes pour optimiser le rapport du coût avec la performance de tels moyens. Au début des années 1990, des expériences menées à l'École polytechnique par le CEG et le Laboratoire de physique des milieux ionisés de Palaiseau ont aidé à comprendre comment limiter les instabilités des plasmas en phase de compression : le rayonnement de *Z-pinch* est ainsi rendu plus efficace. Ces résultats ont conduit à retenir la striction magnétique axiale comme source radiative.

Contrairement au générateurs à stockage capacitifs utilisés depuis 20 ans dans d'autres expériences, nous avons préféré les générateurs à stockage inductifs. Ce choix est fondé sur un potentiel d'innovation plus intéressant, aussi bien du point de vue technique que du coût. Dans le stockage capacitif, l'énergie électrique est stockée dans des lignes à eau, des condensateurs qui sont déchargés par la fermeture d'un interrupteur de puissance (un éclateur). La quantité d'énergie stockée est ainsi limitée par la rigidité diélectrique de l'eau. Le volume des lignes à eau du générateur Z est déjà de 5 000 mètres cubes. Avec le générateur X1, on atteint des volumes énormes. En revanche, avec le stockage inductif, on emmagasine l'énergie dans une bobine, sous la forme d'un champ magnétique. Pour un volume donné, la quantité d'énergie stockée est bien supérieure.

L'utilisation d'un générateur de stockage inductif nécessite la mise en œuvre de générateurs de courant primaires rapides (décharge en moins d'une microseconde), de lignes de transmission à très basse impédance (pour limiter les pertes par effet Joule) et d'amplificateurs de puissance. Ces derniers, constitués de commutateurs à ouverture de plasma (qui servent de fusible pour transmettre le courant vers le dispositif de striction), compriment l'impulsion électrique avec un front de montée d'une durée inférieure à 100 nanosecondes. Grâce à ce temps de montée, les effets des instabilités de plasma sont fortement limitées pendant la phase de compression de la striction magnétique.

Pour que le générateur soit efficace, on doit supprimer les inductances inutiles. En effet, le ren-

dement d'un générateur inductif dépend directement du rapport d'inductance entre la partie primaire du générateur et celle de la striction magnétique (qui est en général voisine de dix nanohenrys avant implosion). Plus on réduit l'inductance primaire, meilleure est l'efficacité de compression et de rayonnement. Nous avons mis au point des générateurs de 160 kilojoules avec un temps de montée de 700 nanosecondes, ce qui est presque deux fois plus rapide que les générateurs utilisés habituellement. De même, les interrupteurs de puissance, capables de commuter un courant de un million d'ampères et d'inductance inférieure à dix nanohenrys, ont été mis au point en collaboration avec l'Institut des courants intenses de Tomsk, en Russie.

Trois architectures électriques différentes sont à la base de trois générateurs de 640 kilojoules dont les performances sont en cours d'analyse. Si les performances sont celles que l'on attend, un démonstrateur, nommé MAG3, stockant 6,4 mégajoules, capable de délivrer au moins dix millions d'ampères en 100 nanosecondes dans un dispositif à striction magnétique axiale, sera étudié en 1999 et construit en l'an 2000. Jusqu'ici, les générateurs à stockage inductifs confirment leur intérêt économique.

Pour optimiser la conception de notre machine, nous utilisons des simulations numériques qui nous renseignent sur l'évolution des champs électriques et magnétiques dans des géométries complexes. Ces simulations nous aident également à concevoir des lignes isolées magnétiquement qui transportent des intensités de plusieurs millions d'ampères et des tensions de l'ordre du mégavolt. Des simulations en deux dimensions sont aussi élaborées en vue de l'exploitation et de la conception des expériences de striction magnétique.

La métrologie, enfin, enregistre les paramètres utilisés dans les simulations. Des capteurs mesurent les intensités et les tensions sur les électrodes du générateur et à proximité de la zone de striction ; des techniques d'imagerie rapide (interférométrie laser, caméras rapides...) révèlent la dynamique de l'implosion du plasma.

En quelques années, le Centre d'étude de Gramat a acquis une compétence dans le domaine des hautes tensions pulsées. L'avenir nous dira si nos choix ont été judicieux.

Francis KOVACS, DGA, Centre d'études de Gramat



Un des prototypes de 640 kilojoules mis au point au Centre d'études de Gramat. On distingue les générateurs de Marx qui se déchargent dans une ligne de transmission à eau. Cette dernière transmet un courant de deux millions d'ampères dans une ligne à vide qui sert de stockage inductif, puis dans le commutateur à ouverture de plasma contrôlé magnétiquement qui amplifie la puissance vers la cible (au premier plan).