

Fusion nucléaire et striction axiale

GEROLD YONAS

Un dispositif nommé machine à striction axiale déclenchera la fusion nucléaire contrôlée à l'aide de bouffées de rayons X intenses et brèves.

Quand maîtrisera-t-on la fusion nucléaire, en laboratoire? En 1979, après déjà 30 ans de recherches, l'ignition n'avait été obtenue que dans la bombe à hydrogène ; toutefois j'écrivis dans *Pour la Science* que la fusion pourrait être obtenue en laboratoire en moins de dix ans et que la construction de centrales électriques à fusion suivrait de peu. À l'époque comme aujourd'hui, les physiciens savaient qu'un dé à coudre d'hydrogène lourd liquide engendre, par fusion, autant d'énergie que 20 tonnes de charbon ; d'où la question : comment récupérer cette énergie?

Vingt ans ont passé, les physiciens courent toujours après le Graal de la fusion, et l'ignition, pensent-ils, est encore pour dans dix ans. La crise de l'énergie des années 1970 est oubliée, et les contribuables s'impatientent. Il y a moins de trois ans, j'envisageais même d'interrompre nos recherches sur la fusion, aux Laboratoires Sandia, car nous produisons une puissance encore 50 fois inférieure à celle qui déclencherait la fusion. Puis tout a basculé : ma confiance a été rétablie par les succès obtenus dans la production de puissantes impulsions de rayons X à l'aide d'un nouveau dispositif, le générateur Z. Je crois que la fusion thermonucléaire

1. LE FONCTIONNEMENT DU GÉNÉRATEUR Z est spectaculaire. Les lignes de transmission sont immergées dans l'eau pure pour être isolées électriquement. Une très faible proportion de l'énergie produite s'échappe à la surface de l'eau sous la forme de longues décharges électriques. L'événement dure seulement quelques microsecondes. Un appareil photographique avec l'obturateur ouvert enregistre les décharges rapides sous forme d'un réseau de traces brillantes.

sera déclenchée en laboratoire dans moins de dix ans.

La bombe à hydrogène (ou bombe H) est la démonstration terrifiante que la fusion thermonucléaire est possible. Dans ce dispositif, le rayonnement issu de l'explosion d'une bombe à fission (une bombe A) agit comme un détonateur : il chauffe et comprime un combustible composé de deutérium et de tritium, des formes d'hydrogène dont les noyaux contiennent respectivement un proton et un neutron, et un proton et deux neutrons (contre un proton seulement pour l'hydrogène). En pratique, la réaction de fusion de ces noyaux d'hydrogène lourd en un noyau d'hélium commence uniquement si la compression est quasi symétrique ; la fusion des noyaux d'hydrogène en hélium libère alors une énergie considérable.

Lors des premières décennies de recherche sur la fusion, la fabrication d'une petite bombe H en laboratoire paraissait inaccessible. Aussi les physiciens ont-ils essayé de déclencher la fusion par confinement magnétique, à l'aide de puissants champs magnétiques qui piègent un mélange chaud (un plasma) de deutérium et de tritium. En 1991, la fusion du deutérium et du tritium fut ainsi obtenue à Culham (JET) dans une machine nommée Tokamak ; plus tard, elle a été reproduite à Princeton (TFTR). La prochaine étape de cette approche est le projet international ITER (*International Thermonuclear Experimental Research*, soit «Recherche expérimentale internationale thermonucléaire»), auquel participent l'Europe, les États-Unis, le Japon et la Russie. Les dépenses d'avant-projet, les difficultés techniques, ainsi que les tergiver-



sations quant à sa localisation ont déjà ralenti la phase de conception.

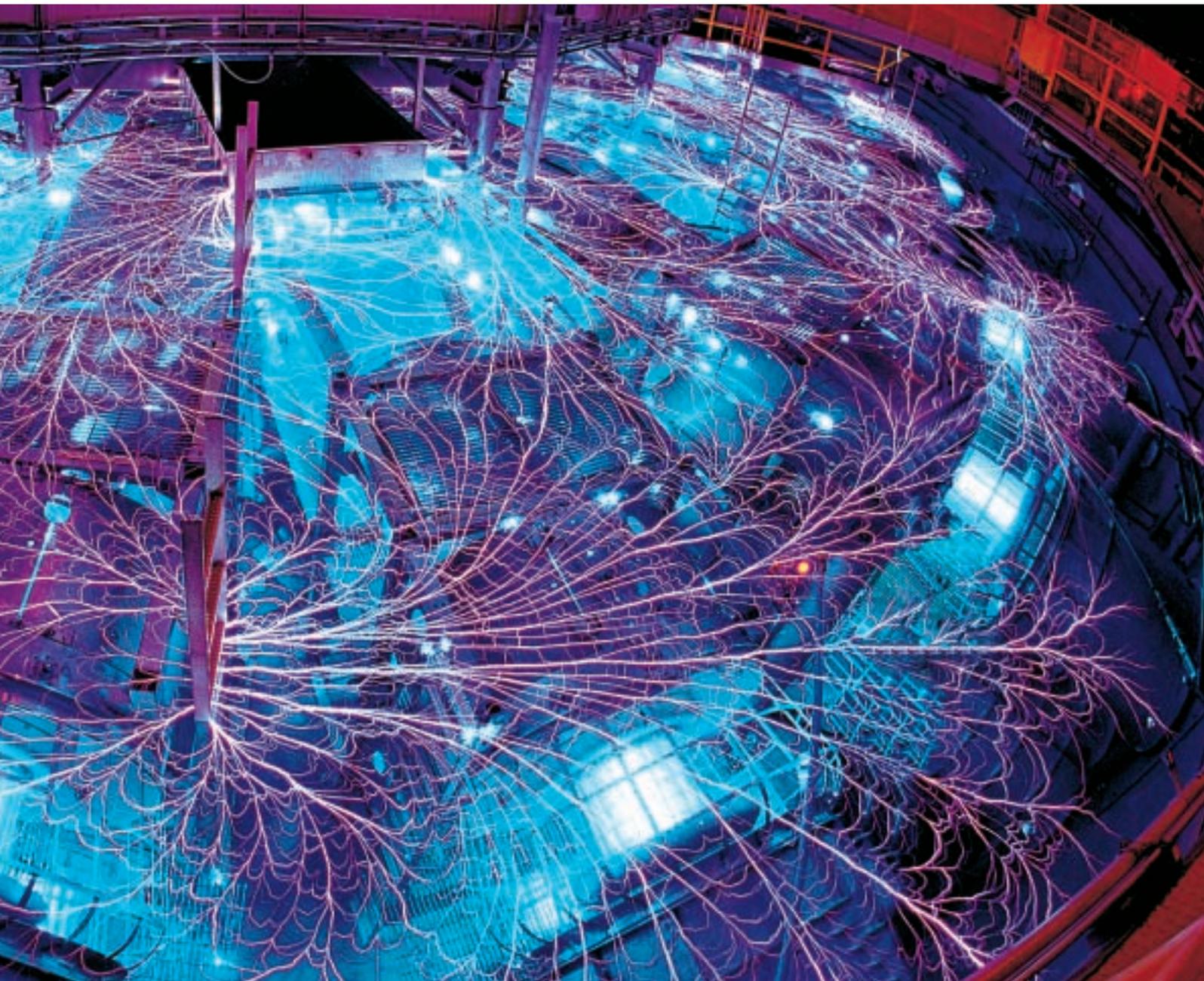
Dès le début des années 1970, des équipes explorèrent une autre voie, celle du confinement inertiel. Dans cette approche, qui reprend le principe de la bombe H, on cherche à utiliser des rayonnements pour comprimer une petite capsule contenant de l'hydrogène. Alors que la bombe H est déclenchée par le rayonnement dû à l'explosion d'une bombe A, les premières tentatives de fusion inertielle en laboratoire utilisaient d'intenses faisceaux laser ou d'électrons pour faire imploser la capsule de combustible.

À l'époque, on avait largement

sous-estimé la puissance nécessaire pour assurer l'ignition. En 1978, on supposait que la fusion se déclencherait si l'on fournissait un mégajoule en dix nanosecondes sur la surface d'une capsule de la taille d'un grain de poivre. Cette puissance de 100 térawatts (100 000 milliards de watts) équivaut à la consommation électrique de un million de foyers pendant plusieurs heures, concentrée en une fraction de seconde. Pour l'obtenir, quelques équipes ont exploré une nouvelle technique : la haute tension pulsée.

Dans cette technique, l'énergie électrique est stockée dans des condensateurs à eau, qui la libèrent en brèves

impulsions. Afin d'obtenir une puissance encore supérieure, on raccourcit la durée des impulsions et on les comprime spatialement pour accroître la densité de puissance. Ces bouffées d'énergie électromagnétique sont alors converties en impulsions intenses de particules chargées, en rayonnement X, ou utilisées pour le pilotage d'autres systèmes. Dans la fusion par laser, en revanche, des impulsions électriques beaucoup plus longues sont amplifiées et contractées dans une ligne laser. La haute tension pulsée semble être une meilleure solution que le laser, en raison d'un meilleur rendement et d'un coût peu élevé.



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

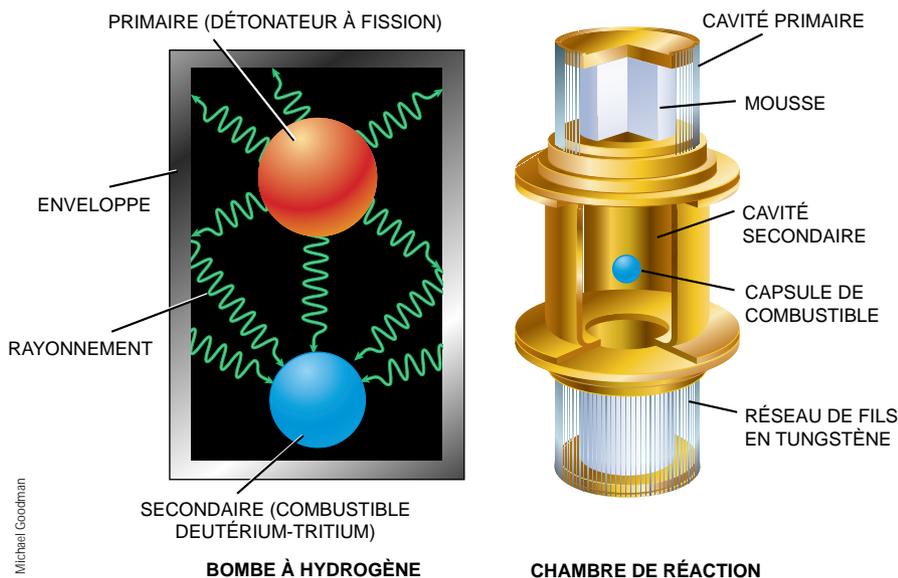
étape vers les rendements élevés, mais il ne sera pas le prototype du système de fusion nucléaire contrôlée.

Renaissance de la striction

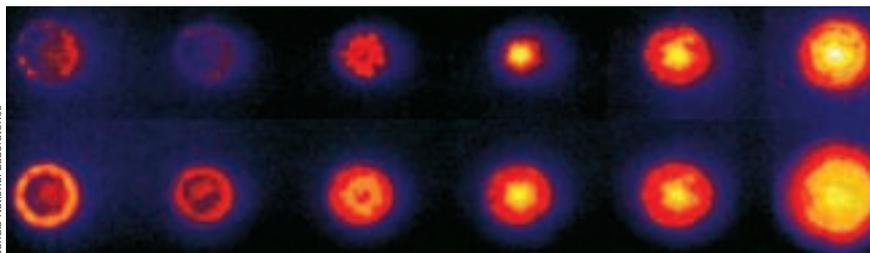
Il y a seulement quelques années, le système à hautes puissances pulsées des Laboratoires *Sandia* restait très insuffisant, de sorte que nous avons hésité à prolonger nos études. Notre persévérance fut récompensée : la puissance engendrée a crû considérablement. Alors que dans les années 1960, la puissance 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 impluse symétriquement.



3. DES RAYONS X sont produits quand le plasma issu de la vaporisation d'un grand nombre de fils de tungstène impluse 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 supérieures 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

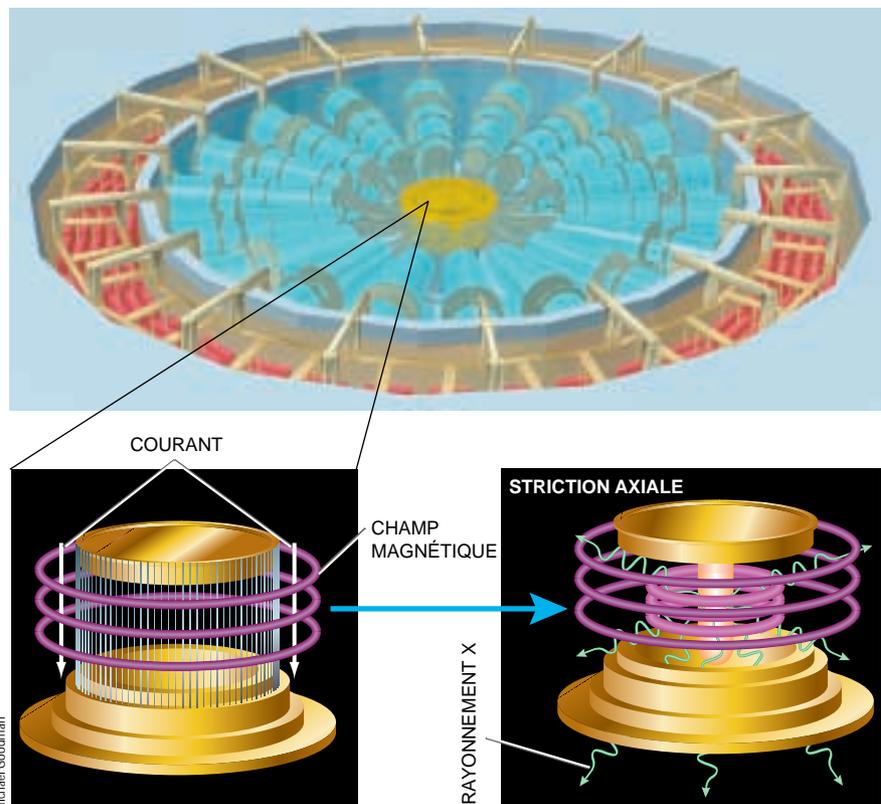
soigneusement déposée sur de l'huile. Elle gêne la fusion, mais des simula- tions numériques ont montré que, plus le plasma initial est uniforme, plus la striction est régulière le long de l'axe du champ magnétique, lors de la pro- duction du rayonnement X.

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 cour- ant 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 nanosecondes. Traversant un gaz interrupteur commandé par laser, les 36 impulsions sont synchronisées à moins de une nanoseconde près. L'impulsion résultante est transférée au dispositif à fils (en bas, à gauche), via 4 lignes de transmission isolées magnétiquement pour minimiser 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 limités 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*).

courant de 10 millions d'ampères. Depuis octobre 1996, elles se poursuivent sur le générateur-Z, qui produit un courant de 20 millions d'ampères. Cette machine est celle qui fournit les bouffées X les plus énergiques et les plus puissantes : lors des expériences, on produit deux mégajoules de rayonnement X en quelques nanosecondes, soit une puissance rayonnée supérieure à 200 térawatts.

En novembre 1997, nous avons accru la puissance de rayonnement X de 45 pour cent, atteignant 290 térawatts, à l'aide de deux réseaux de fils concentriques. Le courant vaporise les fils extérieurs en un plasma que le champ magnétique accélère vers le cylindre central. Le plasma externe, plus rapide, frappe alors le cylindre central de fils. Les parties plus lentes se mélangent au cylindre de plasma central, qui, à son tour, implose. Cette structure réduit les instabilités de l'implosion et, lorsque les matériaux vaporisés entrent en collision sur l'axe z, ils créent une impulsion X plus courte que celle d'un dispositif à un seul cylindre. À l'aide de ce système à double détente, on atteint une température de 1,8 million de degrés (soit 164 électronvolts).

D'autres expériences sur le générateur-Z, avec un dispositif constitué de couches de mousse entourant un tube de béryllium à l'intérieur d'un dispositif à simples fils, ont produit une implosion plus lente et aussi plus symétrique du plasma résultant de la striction axiale.

Il aura fallu 40 ans pour atteindre 40 térawatts de puissance X à l'aide d'une striction axiale, mais les trois dernières années sont celles qui nous ont fait le plus progresser, et nous approchons du but : une température de la cavité centrale de trois millions de degrés, nécessaire à l'obtention de la fusion avec un gain élevé, engendrée par un rayonnement X de 16 mégajoules et de 1 000 térawatts. Nos expériences ont confirmé que la puissance pulsée est plus efficace et moins coûteuse que le confinement par laser : notre dispositif à striction axiale produit une énergie de rayons X totale égale à 15 pour cent de l'énergie électrique initialement injectée, alors que l'efficacité du laser Nova n'est que de 0,1 pour cent. Avec le NIF, la prochaine génération de lasers, on atteindra peut-être une efficacité de 0,5 pour cent, mais l'inefficacité des lasers ne permettra pas d'aller beaucoup plus loin.

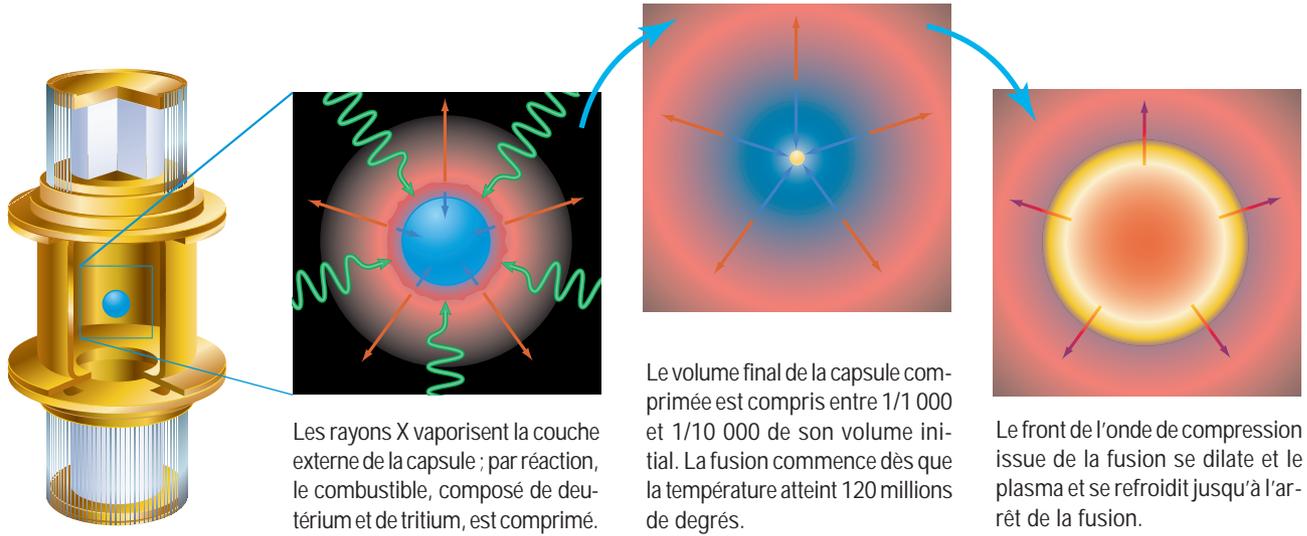
Gagner un facteur trois

Les impulsions intenses de rayons X ont de nombreuses applications autres que le confinement inertiel. Les énergies et les puissances accessibles par la machine autorisent déjà la mesure en laboratoire de propriétés des matériaux, ainsi que l'étude de la propagation des rayonnements à des densités et à des températures que l'on n'atteignait que par des explosions nucléaires souterraines. Les têtes nucléaires sont soumises à une irradiation permanente de la part du plutonium qu'elles contiennent. L'étude de l'influence du rayonnement sur les bombes permet d'étudier leur vieillissement : des machines à courant intense garantirait ainsi la sûreté et la fiabilité des bombes nucléaires vieillissantes.

Les astrophysiciens sont également intéressés par la striction axiale, car les plasmas engendrés par le générateur-Z sont similaires à ceux des couches externes des étoiles. Le comportement de certaines étoiles variables, telles les Céphéides, est maintenant mieux compris grâce aux données obtenues par les expériences de striction axiale. Des expériences ultérieures éclaireront d'autres phénomènes cosmiques, telles les supernovae. Les plasmas de laboratoire offrent également la possibilité de nouvelles études en physique atomique et sur les lasers à rayons X.

La striction axiale est une source de rayons X remarquablement efficace et reproductible : expérience après expérience, on obtient toujours les mêmes énergies sous forme de rayons X, même si l'on ignore encore le détail des phénomènes. On observe que, chaque fois que l'on double le courant, l'énergie X résultante est quadruplée, et le rayonnement thermique croît avec la racine carrée de l'intensité électrique, conformément à la théorie. Si ces lois restent vraies à haute énergie, une augmentation d'un facteur trois de l'intensité électrique, portant celle-ci à 60 millions d'ampères, permettrait d'atteindre l'énergie, la puissance et la température requises pour déclencher une fusion avec un gain élevé.

Quels problèmes devons-nous résoudre afin d'obtenir la fusion ? Nous devons d'abord nous assurer que l'on peut contenir le courant dans la cavité. Des résultats obtenus à l'Institut Kurchatov, il y a 30 ans, et des confirmations de la Société *Physics International* et des Laboratoires *Sandia*, indiquent qu'une énorme concentration de puis-



Les rayons X vaporisent la couche externe de la capsule ; par réaction, le combustible, composé de deutérium et de tritium, est comprimé.

Le volume final de la capsule comprimée est compris entre 1/1 000 et 1/10 000 de son volume initial. La fusion commence dès que la température atteint 120 millions de degrés.

Le front de l'onde de compression issue de la fusion se dilate et le plasma et se refroidit jusqu'à l'arrêt de la fusion.

5. LES RAYONS X issus de la striction compriment le combustible contenu dans la capsule et déclenchent la fusion dans la cavité interne. Dans la machine X-1, dont la conception devrait bientôt

commencer, la capsule est comprimée, en moins de dix nanosecondes, en un plasma de la taille du point qui termine cette phrase.

sance dans de petites cavités à striction axiale est sans doute possible.

Les champs électriques intenses tendent à couper les courants qui les créent : notamment des décharges (des claquages) risquent de dissiper l'énergie électrique entre les fils et la paroi latérale de la cavité. On utilise le phénomène d'isolement magnétique pour transmettre de puissantes impulsions électriques le long d'un canal, entre deux surfaces métalliques, sans claquage et presque sans perte d'énergie : le champ magnétique de la puissante impulsion électrique s'oppose à la tendance au claquage du courant. En avril 1998, mon collègue John Porter a observé qu'il n'y avait pas de claquage dans l'intervalle de 1,5 millimètre entre le réseau de fils et le mur de la cavité, même avec d'intenses décharges électriques, ce qui a permis à la température de la cavité d'atteindre 1,7 million de degrés.

Dans les dispositifs utilisés, le courant circule dans un sens dans les fils et revient le long de la paroi de la cavité. Aussi, dans l'inductance formée par l'espace étroit entre les fils et la paroi, une puissance de 50 térawatts est stockée ; la densité de puissance atteint alors 25 térawatts par centimètre carré. Si l'on augmente la puissance jusqu'à 150 térawatts, avec un courant de 60 millions d'ampères, la densité de puissance atteindra 75 térawatts par centimètre carré. Cette augmentation pose de nouvelles questions, car la pression exercée sur le métal de l'enceinte est alors comprise entre 150 et 300 gigapascals, soit 1,5 à 3 millions d'atmosphères. Les parois résisteront-elles à

ces pressions colossales? Les simulations suggèrent que la fusion requiert une grande symétrie. Cette symétrie et l'efficacité de conversion de l'énergie de 15 pour cent seront-elles conservées dans les nouvelles conditions?

Les simulations devront être également améliorées. Les simulations actuelles du fonctionnement, à deux dimensions seulement, ont déjà fourni de nombreuses informations sur le mécanisme de la striction axiale. Bien que restreints à deux dimensions, ces calculs nécessitent une capacité de calcul considérable. La description tridimensionnelle, incluant les déplacements de matière et les émissions des rayonnements, demeure encore inaccessible, mais les avancées en informatique et en imagerie X sont rapides. En 1998, nous avons mis en service l'ordinateur Janus, dont la capacité de calcul est égale à 1,8 téraflop ($1,8 \times 10^{12}$ opérations par seconde en mode virgule flottante, soit plus de 10 000 fois la capacité d'un ordinateur individuel). L'utilisation de nouveaux programmes de simulations sur la nouvelle génération de superordinateurs fera rapidement progresser la technique de striction axiale pour la fusion contrôlée.

Nous préparons maintenant la prochaine grande étape. À la fin de mars 1998, le Département américain de l'énergie nous a autorisés à concevoir le générateur X-1, qui succédera au générateur-Z : il devrait fournir 16 mégajoules avec un gain élevé. Son coût devrait être de l'ordre de 2,4 milliards de francs. Rappelons que le

générateur Z, le générateur X-1 et le nouveau laser NIF demeurent des outils de recherche : le générateur Z pourrait atteindre les conditions de la fusion, le laser NIF devrait produire l'ignition, et le générateur X-1, construit grâce aux enseignements du laser NIF, pourrait conduire à des gains élevés ; cependant, aucun de ces dispositifs ne sera une centrale électrique à fusion contrôlée.

Paraphrasant Bernard Shaw, on doit convenir qu'«il est difficile de faire des prédictions, notamment sur l'avenir». Toutefois, si la prochaine étape démarre rapidement, nous pensons réellement atteindre l'objectif, c'est-à-dire la fusion, dans les dix prochaines années.

Gerold YONAS est vice-président de la Division «Systèmes, science et technique» aux Laboratoires Sandia, à Albuquerque (Nouveau-Mexique).

G. YONAS, *La fusion contrôlée par faisceaux de particules*, in *Pour la Science*, janvier 1979.

S. CRAXTON, R. MCCRORY et J. SOURES, *Des progrès dans la fusion nucléaire par laser*, in *Pour la Science*, octobre 1986.

H. FURTH, *La fusion nucléaire*, in *Pour la Science*, novembre 1995.

Jacques COUTANT, *Le laser Mégajoule*, in *Pour la Science*, décembre 1997.

M.K. MATZEN, *Z-Pinches as Intense X-Ray Sources for High-Energy Density Physics Applications*, in *Physics of Plasmas*, vol. 4, n° 5, 2^e partie, pp. 1519-1527, mai 1997.
