

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.

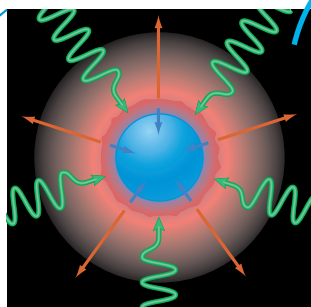
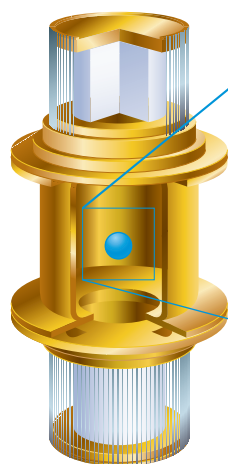
Gagner un facteur trois

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 garantiraient ainsi la sûreté et la fiabilité des bombes nucléaires vieillissantes.

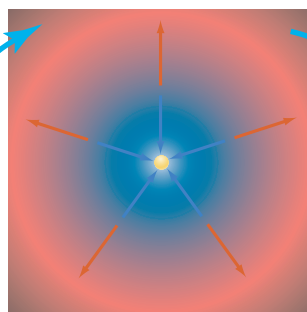
Les astrophysiciens sont également intéressés par la striction axiale, car les plasmas engendrés par le générateur-Z sont similaires à ceux des couches externes des étoiles. Le comportement de certaines étoiles variables, telles les Céphéides, est maintenant mieux compris grâce aux données obtenues par 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.

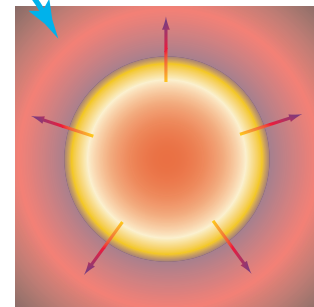
Quels problèmes devons-nous résoudre afin d'obtenir la fusion ? Nous devons d'abord nous assurer que l'on peut contenir le courant dans la cavité. Des résultats obtenus à l'Institut Kurchatov, il y a 30 ans, et des confirmations de la Société *Physics International* et des Laboratoires *Sandia*, indiquent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