

d'hui des représentants des États-Unis, de la Russie, de la Chine, du Japon, de l'Inde, de l'Agence spatiale européenne, de la France, de la Grande-Bretagne et de l'Allemagne. En 1994, le Sous-Comité scientifique et technique des Nations unies pour les utilisations pacifiques de l'espace extra-atmosphérique a finalement inscrit les débris spatiaux à son ordre du jour, avec la volonté d'en achever l'évaluation pour 1999. Ces comités doivent encore décider du type d'actions à entreprendre, de leur mise en œuvre, et trouver un compromis entre les risques et les coûts de ces actions.

En attendant, les agences spatiales tentent de produire moins de débris. En France, le Centre national d'études spatiales a mis en place, depuis 1992, un groupe de travail chargé de mener les études techniques d'évaluation du risque et de déterminer des mesures préventives. De telles mesures sont d'ores et déjà appliquées. Par exemple, après l'injection des satellites en orbite, le dernier étage des fusées Ariane est passivé pour éliminer tout risque d'explosion ultérieure : les réservoirs de carburant sont vidangés et la pression est réduite dans tous les circuits. À l'altitude géosynchrone, les dangers de collision sont moindres, mais la place commence à manquer : afin d'éviter les collisions éventuelles avec les satellites opérationnels, les satellites dont la mission se termine sont transférés sur une orbite cimetière située à environ 300 kilomètres au-dessus de l'orbite géostationnaire.

La NASA et la NASDA, l'agence spatiale japonaise, ont utilisé des pièges à boulons et des attaches spéciales ; elles vidangent aussi le carburant et éteignent les systèmes électriques des satellites hors service ; et elles recommandent que les nouveaux satellites et les étages de fusées laissés à basse altitude soient guidés vers l'atmosphère moins de 25 ans après la fin de leur mission.

Après l'explosion de la fusée Pégase, en 1996, la Société *Orbital Sciences*,

concepteur et opérateur de cet engin, a redessiné l'étage supérieur avant de reprendre les missions en décembre 1997. Certains des nouveaux réseaux de téléphonie par satellite prévoient de faire retomber dans l'atmosphère des satellites devenus inutiles. En janvier 1998, le gouvernement américain a présenté à l'industrie aérospatiale, pour commentaires, un projet de norme de limitation des débris.

Ces procédures, toutefois, ne concernent pas les débris déjà en orbite. La seule protection possible aujourd'hui contre les collisions, en particulier avec les multiples objets de moins de un centimètre de diamètre, est l'ajout sur les satellites de boucliers qui limitent les conséquences des collisions et réduisent le nombre de débris secondaires. La *Station spatiale internationale* sera équipée de tels boucliers autour des compartiments d'habitation, des conduits de carburant, des gyroscopes de contrôle et d'autres zones vitales (voir la figure 4). Pour les éléments impossibles à protéger, tels les panneaux solaires, les concepteurs d'engins spatiaux doivent tenir compte de leur détérioration progressive sous l'effet de petites collisions.

L'élimination des débris reste un défi technique et économique. Certains ont pensé utiliser la navette spatiale, mais cette opération serait trop complexe et trop dangereuse. La NASA et les ministères américains de la Défense et de l'Énergie ont étudié le projet *Orion*, qui utiliserait des lasers au sol pour vaporiser certains matériaux : ils détourneraient ainsi les débris de leur trajectoire et accéléreraient leur chute. D'autres projets sont à l'étude, telles des balles de mousse géantes : une particule pénétrant la mousse perdrait de l'énergie et retomberait plus tôt sur Terre.

Verrons-nous un jour des robots nettoyeurs autour de la Terre ? Si nous ne réduisons pas rapidement le nombre de débris en orbite, nous manquerons bientôt d'espace... dans l'espace.

Nicholas JOHNSON travaille au Centre spatial Johnson de la NASA, à Houston.

N.L. JOHNSON et D.S. MCKNIGHT, *Artificial Space Debris*, Orbit Books, 1991.

Preservation of Near Earth Space for Future Generations, sous la direction de J.A. Simpson, Cambridge University Press, 1994.

Orbital Debris : A Technological Assess-

ment, Committee on Space Debris, Aeronautics and Space Engineering Board, National Research Council, National Academy Press, 1995.

Protecting the Space Station from Meteoroids and Orbital Debris, Committee on International Space Station Meteoroid / Orbital Debris Risk Management, Aeronautics and Space Engineering Board, National Research Council, National Academy Press, 1997.

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

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-

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.



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

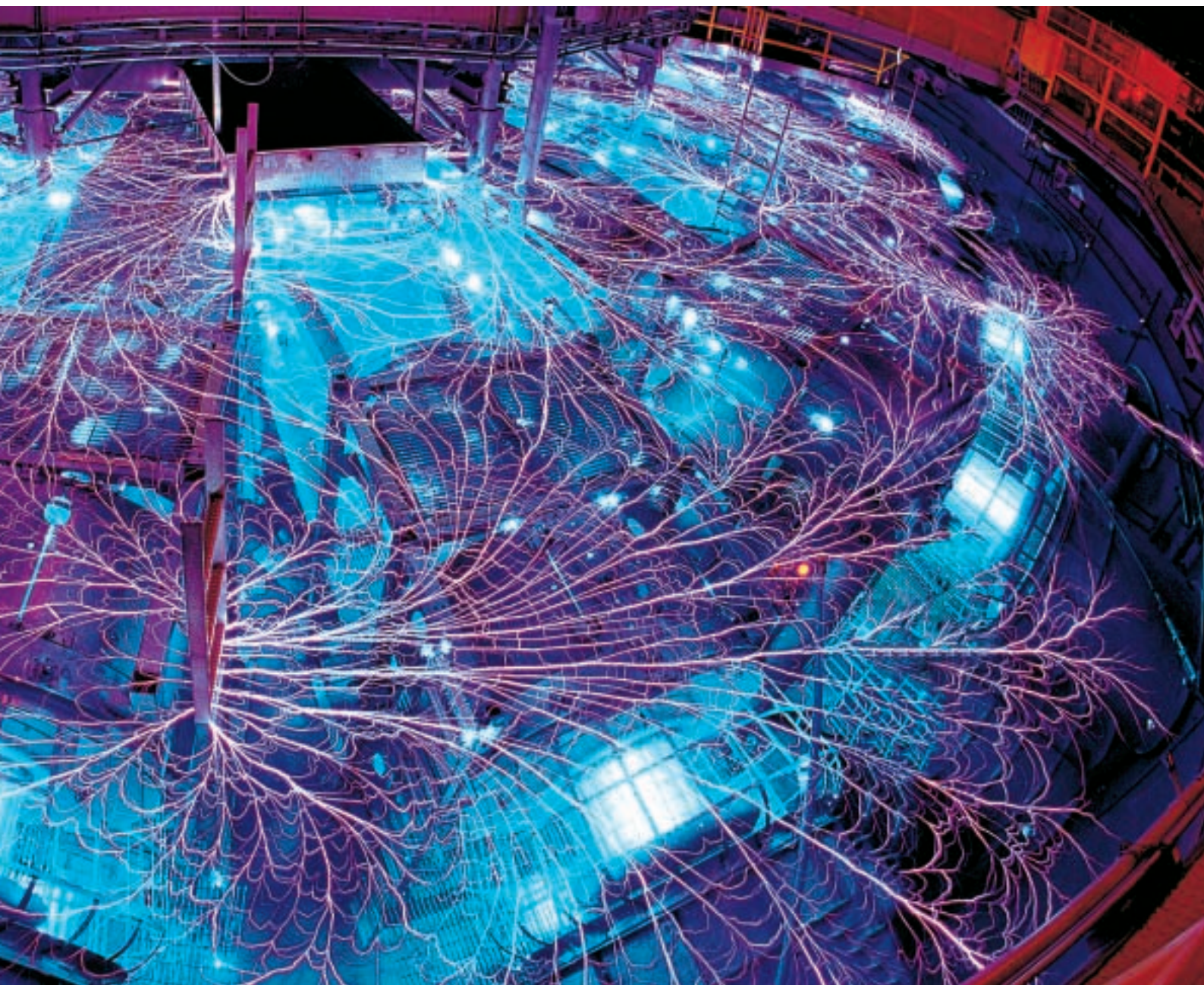
Dès le début des années 1970, des équipes explorèrent une autre voie, celle du confinement inertiel. Dans cette approche, qui reprend le principe de la bombe H, on cherche à utiliser des rayonnements pour comprimer une petite capsule contenant de l'hydrogène. Alors que la bombe H est déclenchée par le 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

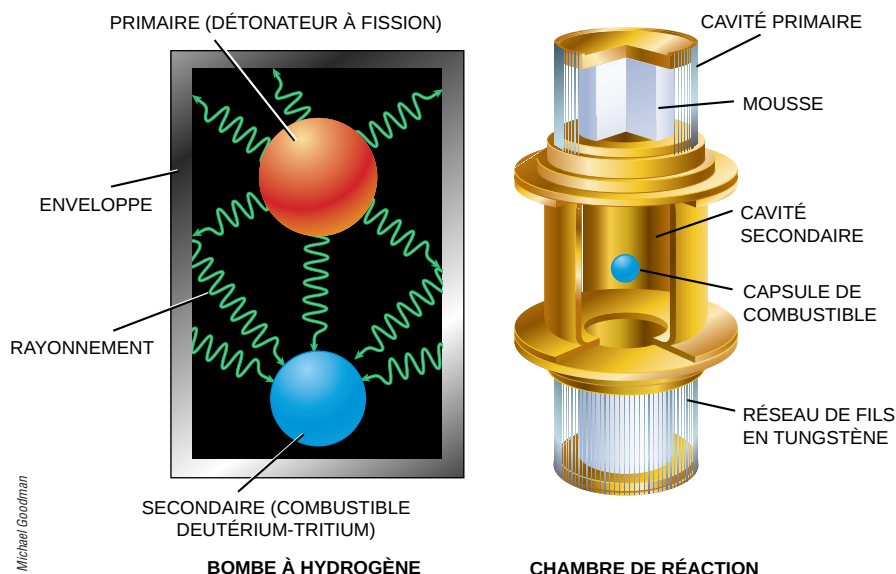
étape vers les rendements élevés, mais il ne sera pas le prototype du système de fusion nucléaire contrôlée.

Renaissance de la striction

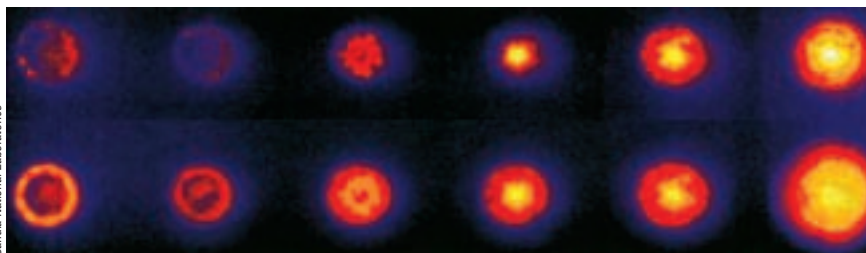
Il y a seulement quelques années, le système à hautes puissances pulsées des Laboratoires *Sandia* restait très insuffisant, de sorte que nous avons hésité à prolonger nos études. Notre persévérance fut récompensée : la puissance engendrée a crû considérablement. Alors que dans les années 1960, la puissance 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 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 supérieures correspond à des rayons X d'énergie supérieure à 800 électronvolts, celle du bas est obtenue avec des rayons X de 200 électronvolts.