

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

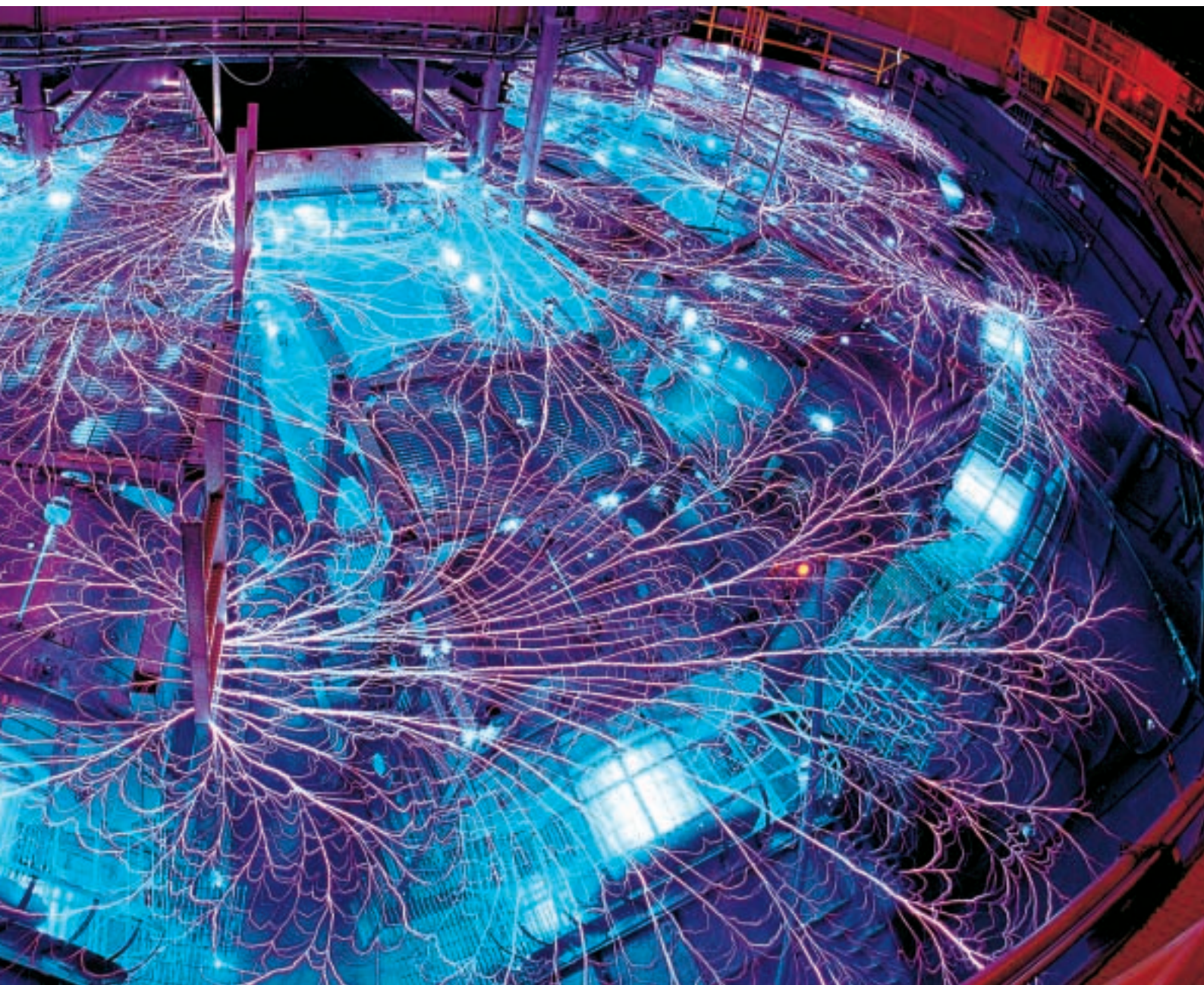
Dès le début des années 1970, des équipes explorèrent une autre voie, celle du confinement inertiel. Dans cette approche, qui reprend le principe de la bombe H, on cherche à utiliser des rayonnements pour comprimer une petite capsule contenant de l'hydrogène. Alors que la bombe H est déclenchée par le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

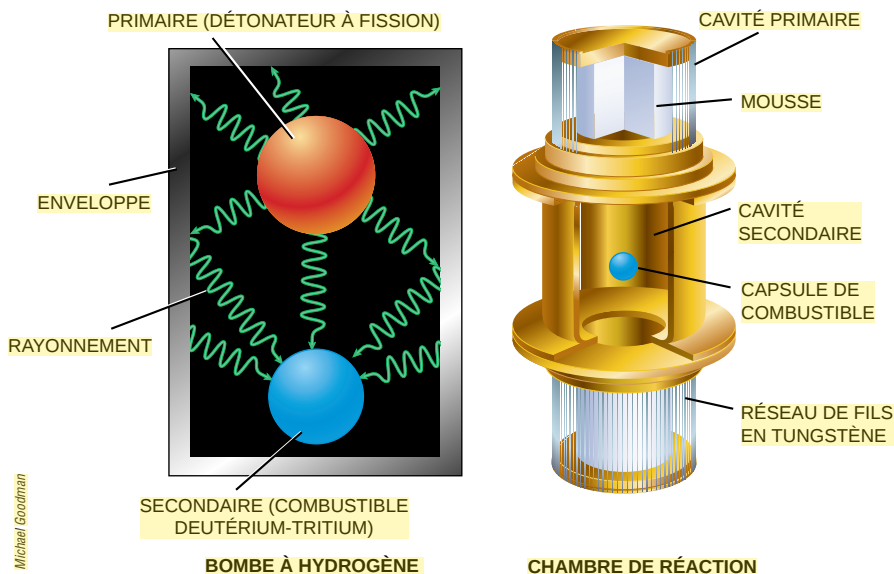
étape vers les rendements élevés, mais il ne sera pas le prototype du système de fusion nucléaire contrôlée.

Renaissance de la striction

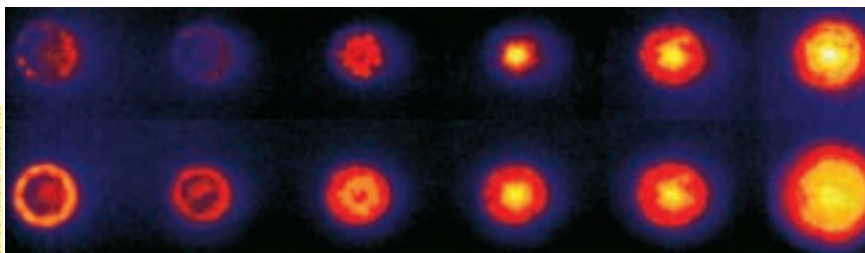
Il y a seulement quelques années, le système à hautes puissances pulsées des Laboratoires *Sandia* restait très insuffisant, de sorte que nous avons hésité à prolonger nos études. Notre persévérance fut récompensée : la puissance engendrée a crû considérablement. Alors que dans les années 1960, la puissance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