



FUSION CONTRÔLÉE: UN ESPOIR RÉITÉRÉ

Des premières bombes H au réacteur du futur

Le rayonnement du Soleil ne nous suffit plus. Pour satisfaire notre soif d'énergie, un espoir est agité depuis une cinquantaine d'années : reproduire sur Terre les réactions qui se déroulent dans les étoiles. Mais quand verra-t-on l'exploitation de la fusion contrôlée ? Curieusement, plus les recherches avancent, plus la mise en service de réacteurs commerciaux paraît lointaine.

Cécile Michaut
est journaliste scientifique.
cecile.michaut@larecherche.fr

DISPOSER D'UNE SOURCE D'ÉNERGIE illimitée en imitant, sur Terre, la fusion des atomes légers qui a lieu dans notre Soleil : depuis plus de cinquante ans, des milliers de scientifiques de tous pays travaillent à ce but. Avec des succès et des échecs, des bonnes surprises et des déceptions. Outre les difficultés techniques, il a d'abord fallu vaincre les réticences politiques, à une époque où le monde était plongé dans la guerre froide. Mais malgré de nombreux efforts, le succès apparaît encore très lointain. Aujourd'hui, les plus optimistes n'envisagent pas le premier kilowatt disponible commercialement avant 2050, tandis que les Cassandres prédisent que la fusion nucléaire contrôlée restera trop compliquée et trop coûteuse pour représenter une solution satisfaisante.

Au commencement était la guerre. Car la fusion nucléaire a d'abord été une arme, la fameuse bombe H (à hydrogène) expérimentée dans les années 1950 par les Américains puis les Soviétiques. La source de l'énergie des étoiles est certes connue depuis les années 1930 et les travaux de l'astronome anglais Eddington : c'est la fusion des noyaux d'hydrogène. Mais, à cette époque, les lacunes scientifiques et technologiques ainsi

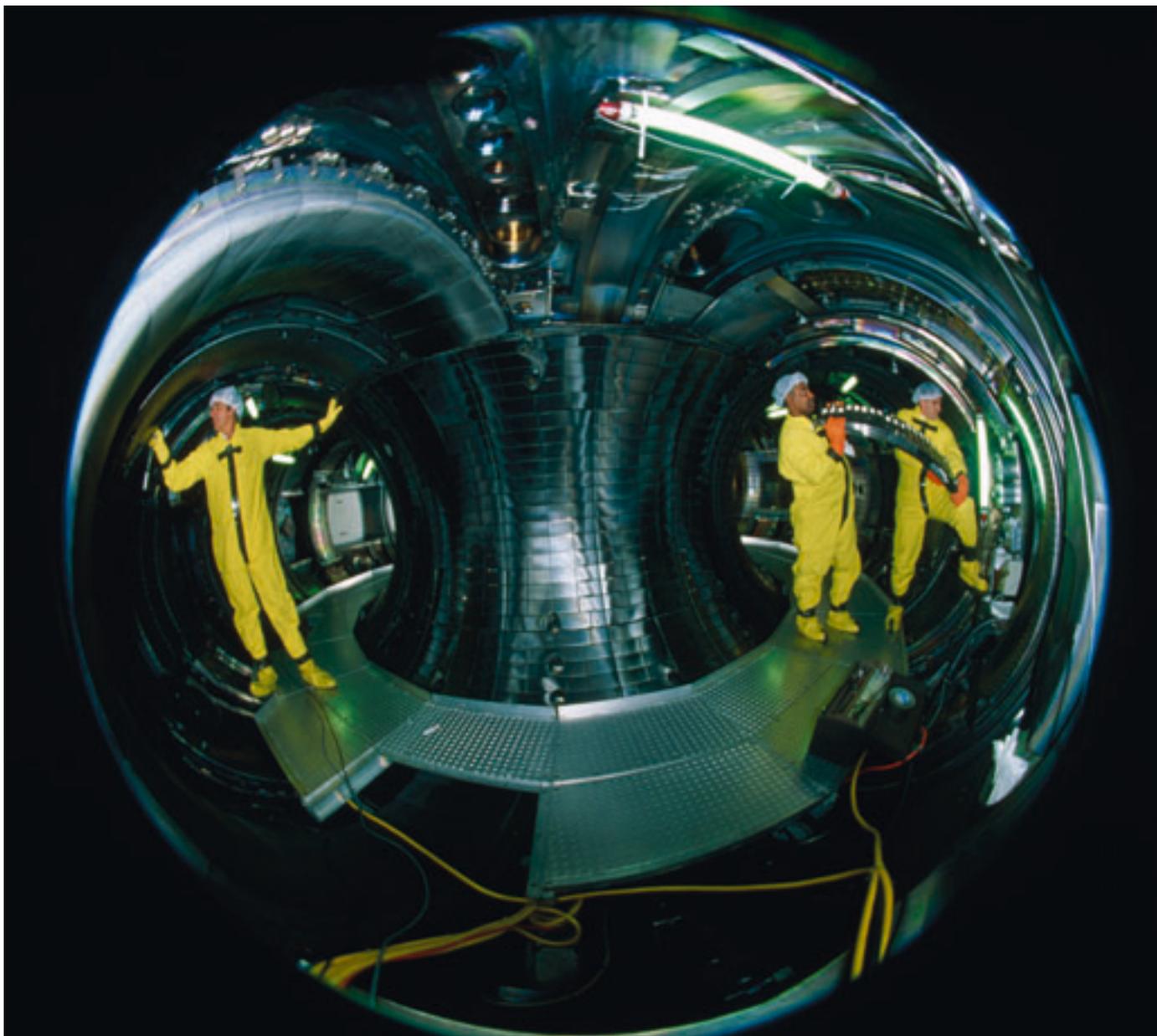
que le contexte géopolitique empêchent les chercheurs d'aller plus loin. Après la Seconde Guerre mondiale, en revanche, les travaux pour reproduire cette fusion démarrent tambour battant. Les Américains menés par Edward Teller et les Soviétiques menés par Igor Kurtchatov testent des bombes H dès 1952-1953. La preuve est ainsi faite qu'il est possible de faire fusionner des atomes pour en tirer de l'énergie. Aussi, parallèlement à la mise au point de ces armes terrifiantes, capables d'atteindre des puissances de plusieurs centaines ou milliers de fois supérieures à celles d'Hiroshima et de Nagasaki, les physiciens commencent à s'intéresser à l'utilisation de cette énergie à des fins pacifiques. Mais une bombe à hydrogène et la fusion contrôlée n'ont finalement que peu d'éléments en commun : dans la première, une bombe à fission sert de déclencheur à la réaction de fusion ; la seconde s'avère bien plus complexe et nécessite l'utilisation de champs magnétiques intenses.

Seuls quelques pays sont alors capables de mener de telles recherches : les États-Unis, l'Union soviétique, la Grande-Bretagne, puis la France, l'Allemagne et le Japon. La guerre froide est à son paroxysme, et chaque grande puissance travaille dans son coin. Mais la

physique est universelle. Un peu plus tard, quand les chercheurs confronteront leurs résultats, ils s'apercevront qu'ils sont arrivés aux mêmes conclusions : il faut obtenir un plasma (VOIR l'encadré « objectif confinement », p. 76) de deutérium et de tritium, le chauffer et le confiner suffisamment pour que les noyaux se précipitent les uns sur les autres et fusionnent.

GUERRE FROIDE ET COLLABORATION

EST-OUEST. La technologie des années 1950 révèle vite ses insuffisances : les pompes ne créent pas un vide excellent et les bobines de cuivre servant d'aimant ne sont pas très performantes. Les plasmas réalisés sont froids et instables, très éloignés des caractéristiques requises pour la fusion. Toutes les équipes peinent, et c'est probablement cette impasse qui va engendrer une collaboration scientifique internationale, extraordinaire à une époque où le secret et la suspicion étaient la règle. En 1955 a lieu la première conférence sur la fusion contrôlée à Genève, en Suisse. Cette conférence affiche un optimisme radical sur le potentiel de la production d'énergie par fusion, comme en témoigne le discours du président de la conférence, Homi Bhabha : « *Je me risque à prédire que nous allons*



Chambre à vide du réacteur expérimental

américain TFTR : construit dans les années 1980 au laboratoire de physique des plasmas de Princeton, ce tokamak fut le premier à tester un combustible comportant du deutérium et du tritium.

©R. Ressmeyer/Corbis

trouver une méthode pour libérer l'énergie de fusion d'une manière contrôlée dans les vingt prochaines années. Lorsque nous aurons réussi, les problèmes mondiaux d'énergie seront définitivement résolus, puisque le combustible sera aussi abondant que l'hydrogène lourd dans les océans. »

Des collaborations rapprochées se font jour. En 1956, une délégation conduite par l'académicien russe Igor Kurtchatov se rend au centre de recherches de Harwell, en Angleterre, pour confronter les résultats. Rétrospectivement, Michel Chatelier, adjoint au chef du département de fusion au CEA de Cadarache (Bouches-du-Rhône), observe qu'« une telle démarche montre combien les applications militaires de la fusion nucléaire contrôlée par confinement

*Le nom TOKAMAK est un acronyme créé à partir des mots russes TOroidalnaya KAMERA ee MAGnitnaya KATUSHKA (chambre toroïdale et bobine magnétique).

magnétique sont faibles ». Mais tout cela n'était qu'un petit galop d'entraînement. Le véritable démarrage des recherches internationales sur la fusion a eu lieu en septembre 1958, une fois de plus à Genève, lors de la seconde conférence « Atomes pour la paix ». Les puissances nucléaires décident alors de déclassifier leurs recherches, permettant aux chercheurs d'étudier leurs systèmes de création et de confinement des plasmas (voir l'encadré « objectif confinement », p. 76), et de comparer leurs performances.

Deux types de machines émergent. Dans les configurations dites ouvertes, les particules se réfléchissent entre deux régions de champ magnétique intense, comme la lumière se réfléchit sur les miroirs. Au bout de nombreux allers et retours, les particules finissent par se rencontrer. Dans les machines

fermées, comme les tokamaks* russes et les stellarators américains, les particules tournent dans une surface torique, en forme de pneu. Ces deux machines diffèrent par la manière dont elles créent le champ magnétique complexe qui confine le plasma. Aucune des deux configurations ne semble alors plus prometteuse que l'autre, les résultats étant décevants des deux côtés. Mais l'enthousiasme est encore de mise, et peu de scientifiques doutent que la fusion est à portée de main, même si le ton est plus mesuré que trois ans auparavant.

FAIRE DE L'ÉNERGIE

OU DE LA SCIENCE ? Le physicien Peter Thoneman, de l'université d'Oxford (Angleterre), précise ainsi dans sa conférence introductive de 1958 : « *Est-ce que nous pouvons produire de l'électricité à partir de la fusion d'éléments légers ? Je pense que nous répondrons à cette question dans les dix ans qui viennent. Si la réponse est positive, dix autres années seront nécessaires pour répondre à la question suivante : une telle source d'énergie est-elle commercialement viable ?* » Edward Teller prévoit déjà que les difficultés seront nombreuses : « *Je pense que la production d'énergie thermonucléaire est possible, mais je ne pense pas qu'elle aura un rôle important durant ce siècle. [...] Toutes ces difficultés peuvent rendre ce mode de production d'énergie si coûteux qu'une exploitation économique de réactions ther-*



© Bettmann/Corbis



© Novosti

Edward Teller (en haut) et Igor Kurtchatov : patrons respectifs, aux États-Unis et en Union soviétique, du développement de la bombe H au début des années 1950, l'un et l'autre ne sont pas restés étrangers aux premières recherches sur la production d'énergie thermonucléaire.

monucléaires contrôlée ne soit pas possible avant la fin du XX^e siècle. » Prudence partagée par Lev Artsimovich, le directeur de l'Institut pour l'énergie atomique de Moscou, qui souligne : « *Nous ne devons pas être pessimistes dans l'évaluation de nos travaux futurs, mais nous ne devons pas sous-estimer les difficultés que nous devons vaincre avant de maîtriser la fusion thermonucléaire.* » Il relève au moins un aspect positif de ces difficultés : « *Ce problème semble avoir été créé exprès dans le but de développer une coopération étroite entre les scientifiques et les ingénieurs de différents pays.* » L'appellation « Atomes pour la paix » n'est pas usurpée.

La conférence a également mis au jour le manque de connaissances en physique des plasmas. Les recherches sur la fusion peinent car elles sont clairement bâties sur des fondations insuffisantes. « *Les spécialistes de la fusion voulaient faire de l'énergie, pas de la science. L'avenir leur a montré qu'ils devaient d'abord faire des recherches fondamentales sur les plasmas pour parvenir à la fusion* », raconte Michel Chatelier. Les années 1960 seront donc celles du retour aux bases, à la fois sur les concepts théoriques et sur les technologies de production et de confinement des plasmas. Les efforts se coordonnent autour d'organismes internationaux comme Euratom, créé en 1957. En France, c'est le Commissariat à l'énergie atomique (CEA) qui mène les recherches sur plusieurs concepts de machines.

PREMIERS SUCCÈS

RUSSES. Aucun résultat d'importance n'apparaît jusqu'à la conférence de 1968 à Novossibirsk, en Russie, où les chercheurs de l'Institut Kurtchatov présentent des résultats impressionnants obtenus dans leur tokamak T3. La température des électrons de leur plasma atteint 6 millions de degrés, bien mieux que les performances des concurrents. Un scepticisme généralisé accueille néanmoins cette annonce : ne s'agirait-il pas d'un coup de bluff politique pour faire admirer le prestige de la science soviétique ? D'autant que la méthode de mesure des chercheurs russes est indirecte et sujette à caution. Ces derniers invitent donc les Anglais du laboratoire de Culham, qui avaient développé des méthodes optiques directes pour connaître la température du plasma, à venir faire des mesures eux-mêmes en Russie. La confirmation des résultats russes impressionne toute la communauté de la fusion, et installe les tokamaks sur le devant de la scène. Dans

La fusion de deux noyaux très légers produit un noyau plus lourd et dégage une très grande énergie. Dans le Soleil, ce sont des noyaux d'hydrogène qui fusionnent et forment de l'hélium. Dans les réacteurs, on utilisera leurs isotopes plus lourds, le deutérium et le tritium, car leur probabilité de fusionner est bien plus grande. Les noyaux sont chargés positivement et se repoussent donc fortement. Pour les forcer à s'unir, il faut d'abord casser les atomes afin de séparer les noyaux de leur électron, formant ainsi un plasma. Puis on doit le concentrer très fortement et le chauffer jusqu'à 100 millions de degrés, afin que les noyaux acquièrent suffisamment d'énergie pour vaincre leur répulsion. Bien sûr, aucun matériau ne résiste à de telles températures. Aussi, n'est-ce pas un récipient qui confine les noyaux, mais un champ magnétique très puissant formé par de gigantesques aimants. Le plasma est chauffé de plusieurs manières : par le courant qui circule en son sein, par injection d'un faisceau d'ions de grande énergie, et par ondes électromagnétiques. Lorsque la fusion a lieu, les noyaux d'hélium créés possèdent beaucoup d'énergie et contribuent aussi à chauffer le plasma. Malheureusement, celui-ci est très instable et ressemble à une maison mal isolée : une partie de la chaleur s'échappe inexorablement. Le temps pendant lequel on réussit à le garder confiné dans un petit volume à haute température est appelé « temps de confinement », qui devra atteindre typiquement cinq secondes dans le projet Iter actuel. Toutes ces difficultés n'existent pas dans le Soleil : sa masse est telle que les noyaux d'hydrogène sont confinés par la simple force de gravitation, et chauffés grâce aux réactions de fusion. ◇



Tore Supra, le tokamak du CEA, installé

les années qui suivent, ces équipements se multiplient. Plus de 20 machines, certes de taille modeste, sont construites dans les années 1970, dont deux en France, le TFR à Fontenay-aux-Roses (Hauts-de-Seine) suivi de Pétula à Grenoble. Ce foisonnement de recherches permet d'améliorer les connaissances sur les plasmas, les impuretés et les phénomènes de turbulence, ainsi que sur le chauffage, le champ magnétique et les méthodes de mesure de la température ou de la densité.

Malheureusement, les résultats sont assez décourageants : il apparaît que le plasma est naturellement instable. À la moindre perturbation, il se refroidit et disparaît. Ces instabilités ont lieu à l'échelle du système, mais aussi au niveau local. Or, autant les premières sont maîtrisables en peaufinant la forme des champs magnétiques, autant les secondes sont intrinsèques et donc impossibles à éliminer complètement. Le plasma ressemble à un oignon, avec des « peaux » de températures différentes. Le cœur est chaud, alors que les rebords sont plus froids. La turbulence transporte la chaleur d'une « peau » à une autre, et rend les échanges thermiques trop rapides pour obtenir les températures de cœur recherchées.

à Cadarache. En fonctionnement depuis 1988, le réacteur a été complètement renouvelé entre 2000 et 2002, notamment afin d'augmenter sa capacité d'extraction de puissance (jusqu'à 25 MW).

©CEA/P. Fiet

Il apparaît assez rapidement qu'une manière très efficace d'éviter un refroidissement trop important du cœur du plasma est d'augmenter la taille des tokamaks. En effet, tout comme un enfant se refroidit plus vite qu'un adulte, une grande installation garde mieux la chaleur qu'une petite. Et surtout, cet effet n'est pas linéaire : en multipliant la taille d'un tokamak par deux, on multiplie *grosso modo* par quatre le confinement du plasma. Revers de la médaille, il faut aussi chauffer davantage. Mais la réussite de la fusion est à ce prix.

De tels tokamaks ne sont plus à la portée d'un seul laboratoire, ni même d'un pays. L'Europe souhaite se doter d'une telle machine. La décision de construire le Joint European Torus (JET) est prise en 1978, après plusieurs années d'incertitudes concernant le

choix du site (déjà !) près d'Oxford, en Angleterre. Sa construction s'achève en 1983. Il est prévu que ce tokamak soit cinquante à cent fois plus volumineux que les machines des années 1970, afin de démontrer clairement l'effet de taille prévu théoriquement. Parallèlement, trois autres grands tokamaks voient le jour dans ces années 1980 : le Tokamak Fusion Test Reactor (TFTR) aux États-Unis, conçu après le Jet mais construit avant, le JT-60 au Japon, qui démarre en 1985, et le tokamak à aimants supraconducteurs Tore Supra en France. Les Russes ont d'autres priorités scientifiques, notamment la course à l'espace, mais ils ne se désintéressent pas de la fusion, pour laquelle ils mènent surtout des travaux théoriques.

EFFET

DE TAILLE. Les premiers résultats confirment que l'effet de taille est important. Le temps de confinement du plasma est multiplié par 500 par rapport au tokamak T-3 russe. Il atteint une seconde, contre deux millisecondes auparavant. Le TFTR américain obtient des résultats similaires. Les deux tokamaks sont prévus pour fonctionner d'abord avec du deutérium uniquement, puis avec du tritium. En effet, le tritium étant radioactif, les interventions ultérieures dans

l'enceinte du tokamak nécessitent l'utilisation de télémanipulateurs, ce qui augmente la difficulté de l'exercice. Les expériences avec du tritium n'auront donc lieu que lorsque toutes les améliorations de la machine auront été effectuées. De son côté, le JT-60 japonais n'est conçu que pour de l'hydrogène, mais il comporte, tout comme le Jet, un dispositif indispensable pour les futures machines, le « divertor ». Celui-ci permet d'éliminer les impuretés qui se forment par interaction du plasma avec la paroi et risquent de polluer le plasma.

AIMANTS SUPRACONDUCTEURS

À CADARACHE. En 1988, le tokamak Tore Supra entre en service à Cadarache (Bouches-du-Rhône). Son but est d'abord technologique avant d'être physique : il est cinq fois moins volumineux que le Jet, et ne peut donc pas rivaliser en termes de performances. En revanche, alors que les autres tokamaks étaient construits avec des technologies conventionnelles pour étudier les plasmas sur des échelles de temps courtes, Tore Supra sert à tester les techniques permettant de maintenir des décharges sur de longues durées. Il comporte donc des aimants supraconducteurs refroidis à des températures proches du zéro absolu, qui ne chauffent pas lorsqu'on crée un champ magnétique, contrairement aux aimants en cuivre des autres tokamaks. De plus, un dispositif d'eau circulant à grande vitesse et entourant le plasma permet d'extraire la chaleur du plasma en continu.

De nouveau, une mauvaise surprise attend les spécialistes de la fusion : lorsqu'on chauffe davantage le plasma, on crée plus de turbulences et les pertes de chaleur tendent à augmenter. Certes, les physiciens arrivent à créer des « barrières » s'opposant à la fuite de chaleur par stabilisation de la turbulence locale. Mais les dispositifs de chauffage devront néanmoins être encore plus imposants que prévu. Malgré cela, les résultats de ces premiers grands tokamaks rassurent les physiciens, qui ont apporté la preuve que la fusion est possible. Mieux, les puissances atteintes, jusqu'à 16 mégawatts thermiques pour le Jet, ont été très proches du « *break-even* », au-delà duquel on récupère plus d'énergie qu'on en injecte pour créer les conditions de la fusion. Dans Tore Supra, des décharges de plus de six minutes ont été produites.

Mais après ? Il faut maintenant montrer qu'on est capable de produire bien plus d'énergie qu'on en injecte, donc maîtriser des

réacteurs encore plus gros fonctionnant en continu. Dès les premiers résultats rassurants sur le Jet et le TFTR, l'idée d'un grand projet international allant largement au-delà du *break-even* et fonctionnant sur de très longues durées apparaît naturellement, proposée à l'origine par les Soviétiques. Ainsi est né au milieu des années 1980 le projet Iter, considéré comme la dernière démonstration scientifique et technique avant la construction d'un prototype industriel. Ce tokamak, rassemblant initialement la Communauté européenne, les États-Unis, le Japon et la Russie, a pour but d'atteindre l'ignition (puissance de fusion à partir de laquelle il n'est plus nécessaire d'apporter de la puissance externe au plasma). Il s'agit également de montrer que l'effet de taille reste valide à ces échelles, et de tester en vraie grandeur certaines technologies du réacteur.

UN PROJET REVU

À LA BAISSÉ. Les études de dessin détaillé d'Iter se déroulent entre 1992 et 1998 et un dossier complet est remis aux partenaires à l'été 1998. Le coût du projet, 10 milliards de dollars, est jugé trop élevé par les Américains qui se retirent. C'est un coup dur, d'autant plus que la Russie, pourtant très active, est incapable du moindre financement suite à l'effondrement de son économie. Deux options s'ouvrent alors aux promoteurs du projet : soit abandonner et reporter la fusion à un avenir très lointain, soit revoir Iter à la baisse. Un nouveau projet presque deux fois moins cher voit alors le jour en 2001, rassemblant l'Union européenne, le Japon et la Russie. Il réduit la taille du tokamak et revoit ses objectifs technologiques à la baisse, pour un coût estimé à 4,7 milliards d'euros de construction sur huit à dix ans et 4,8 milliards d'euros pour l'exploitation sur vingt ans. Le but n'est plus l'ignition, mais de produire dix fois plus d'énergie qu'il n'en est injecté. La fusion doit atteindre une puissance de 400 à 500 mégawatts pendant au

moins quinze minutes. 70 % du chauffage du plasma sera assuré par les noyaux d'hélium produits lors de la fusion, et 30 % par un apport d'énergie extérieur. Enfin, un équipement important est abandonné : il s'agit d'un dispositif permettant de régénérer le tritium à l'intérieur même du tokamak. Le tritium sera donc fabriqué à l'extérieur.

La frugalité paie. En 2003, les États-Unis renouent avec le programme Iter allégé, la Chine et la Corée s'invitent dans le cercle. Reste la difficile question du choix du site. Son enjeu est plus politique que scientifique, car les retombées économiques pour la région choisie sont énormes. Des quatre sites prévus au départ, au Canada, en Espagne, au Japon et en France, ne restent que les deux derniers, qui ne sont pas départagés à l'heure où nous écrivons ces lignes.

Les scientifiques, instruits par l'expérience, ne se hasardent plus à pronostiquer la fusion avant plusieurs décennies. Les effets d'annonce des années 1970, dus aussi bien à des connaissances insuffisantes en physique des plasmas qu'à la nécessité de forcer la main aux financements, ne sont plus de mise. Aujourd'hui, les plus optimistes voient les premiers kilowattheures commerciaux arriver dans nos habitations en 2050. « *Deux étapes sont nécessaires : Iter, et un démonstrateur industriel. Or, chacune nécessite dix ans de construction et vingt ans d'études* », explique Michel Chatelier.

La fusion peut gagner la bataille technologique, mais gagnera-t-elle la bataille économique ? L'effet de taille a montré que seuls les gros réacteurs pouvaient être envisagés. Ceux-ci coûteront forcément très cher et ne seront pas utilisables partout. De plus, des études prospectives menées récemment par l'Union européenne montrent qu'au moment où l'énergie de fusion entrera sur le marché, elle sera probablement en concurrence avec les énergies renouvelables qui auront énormément progressé. Rendez-vous dans cinquante ans. C. M. ♦

POUR EN SAVOIR PLUS

☞ C. M. Braams and P. E. Stott, *Nuclear Fusion*, IOP, 2002.

☞ Joseph Weisse, *La Fusion nucléaire*, « Que sais-je », n° 3 659, 2003.

🌐 *Un ensemble de liens sur la fusion :*
http://crppwww.epfl.ch/links_body.html

🌐 *La fusion au CEA :* www-fusion-magnetique.cea.fr

🌐 *Le site du projet Iter :* www.iter.org

🌐 www.larecherche.fr
