



Sur le site du futur réacteur Iter, ingénieurs et chercheurs tentent d'apprivoiser le feu du soleil. Confrontés chaque jour à de nouveaux défis.

# La fusion nucléaire : un rêve en chantier

Reportage à Cadarache CÉCILE MICHAUT  
Photos VO TRUNG DUNG/LOOK AT SCIENCES  
POUR SCIENCES ET AVENIR

Dans ce coin de Provence situé entre Aix et Manosque, les cigales ne sont pas les seules à s'activer. Une cohorte d'ouvriers s'affairent autour d'un trou de 17 mètres de profondeur, plus grand qu'un

terrain de football, et dans lequel sont plantées près de 500 colonnes de béton – des plots antisismiques. D'ici 2018 y sera construit un gigantesque « tokamak », une installation en forme de donut de 30 mètres de haut et 24 mètres de diamètre dans laquelle seront produites des réactions de fusion nucléaire, du même type que celles qui adviennent au sein de notre Soleil (*lire l'encadré*

p. 18). Le réacteur Iter (International Thermonuclear Experimental Reactor) en cours de construction à Cadarache (Bouches-du-Rhône) n'en est encore qu'aux fondations, mais cela n'empêche pas les physiciens de travailler d'arrache-pied pour concevoir le montage des différents composants, améliorer les matériaux (qui seront soumis à rude épreuve), prévoir les robots de

surveillance et de maintenance, ou encore simuler le comportement du plasma où s'opèrent les réactions de fusion nucléaire. Ce plasma – un ensemble de gaz ionisés dans lequel électrons et noyaux ne sont plus liés – est instable. Sa température peut chuter brutalement lorsqu'il éjecte des bouffées d'énergie, projections qui pourraient endommager la machine. Le maîtriser est un enjeu crucial.

## Dix glaçons par seconde

C'est dans le petit frère d'Iter – petit, mais plus ancien, puisqu'il a été mis en service en 1988 –, situé lui aussi à Cadarache, que sont menées la plupart des expériences. Avec ses tuyaux jaunes et ses cubes rouges sortant d'un corps qui mesure l'équivalent de trois étages, Tore Supra ne paie pas de mine, mais il est déjà parvenu à entretenir l'état de plasma pendant six minutes. Un record. Aujourd'hui, on y teste de nouveaux modes de chauffage afin de prolonger cette stabilité le plus longtemps possible. « Nous envoyons notamment des ondes à

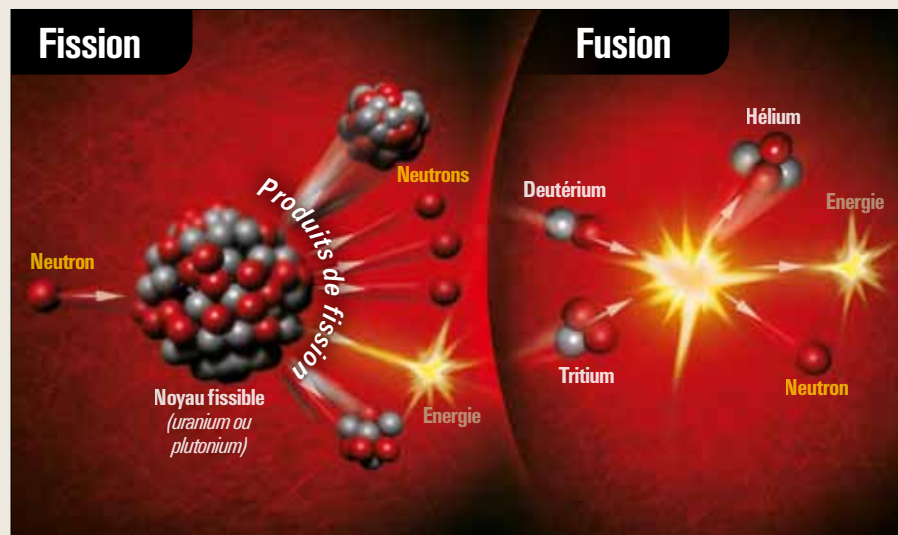
**La résistance des matériaux du réacteur d'Iter sera cruciale pour son avenir. Ici, tests dans le tokamak Tore Supra.**

haute fréquence – 3,7 gigahertz – qui apportent de l'énergie aux électrons à chaque tour de piste dans le tokamak », indique Alain Bécoulet, chef de l'Institut de recherche sur la fusion magnétique, sorte de « bras armé » de la recherche française sur Iter. Une cinquantaine d'instruments de mesure permettent d'analyser le plasma créé et le résultat des actions effectuées pour qu'il dure le plus longtemps possible. Tore Supra permet également d'améliorer le mode d'injection du deutérium et du tritium, les deux éléments qui fusionneront dans Iter. « La méthode que nous employons aujourd'hui est loin d'être optimale, car les atomes envoyés dans le plasma sous forme de gaz ont naturellement tendance à rester en périphérie, où la fusion est moins efficace », indique Alain Bécoulet. Nous envisageons un nouveau mode d'injection du deutérium, sous forme solide. Les glaçons de deutérium à 9 kelvins (-264 °C) pénètrent plus loin, et atteignent plus facilement le centre du plasma. Nous avons donc fabriqué un injecteur capable chaque seconde de propulser 10 glaçons à la vitesse de 300 mètres par seconde. » En passant dans le hall du bâtiment principal de l'Institut de recherche sur la fusion magnétique (IRFM), Alain Bécoulet désigne un fragment du divertor de Tore Supra, le « plancher » du tokamak, dont le rôle est d'extraire la chaleur du plasma. Le matériau de ce divertor doit être d'une résistance à toute épreuve : il subit des flux de chaleur atteignant 10 millions de watts par mètre carré, « soit un quart de la puissance rayonnée par le soleil à sa surface », souligne le chercheur. Il est composé de cuivre dans lequel sont gravés des canaux où circule de l'eau sous pression. L'ensemble est recouvert d'un matériau à base de carbone. Celui-ci est justement capable d'évacuer une puissance de 10 mégawatts par mètre carré – record mondial... mais ne pourra être utilisé pour Iter. « Le plasma arrache en effet des poussières de carbone et forme des hydrocarbures avec le deutérium et le tritium », explique le chercheur. ●●●

**Le site du Cea consacré à la fusion :**  
<http://www-fusion-magnetique.cea.fr>



## Au cœur des réacteurs



MEHDI BENVEZAR POUR SCIENCES ET Avenir HORS-SÉRIE

Deux techniques permettent de fabriquer de l'énergie nucléaire. Soit on casse de gros noyaux d'atomes d'uranium ou de plutonium : c'est ce qui se passe dans nos réacteurs actuels. Soit on fusionne deux petits noyaux pour former de l'hélium – un processus à l'œuvre dans les étoiles. Depuis longtemps, l'idée de recréer la fusion nucléaire sur Terre est dans l'air. Mais la tâche se révèle malaisée : la Terre ne bénéficiant pas de l'énorme gravité qui règne au centre du Soleil, on ne peut comprimer autant les noyaux. Il faut donc les porter à 150 millions de degrés afin qu'ils vainquent la répulsion de leurs charges

positives et fusionnent. Il se forme alors un état de la matière appelé plasma, très instable, qu'il faut maintenir pendant des heures... Pour cela, on confine les noyaux dans une enceinte en forme de très grosse chambre à air, le tokamak, entourée de gigantesques aimants. Contrairement au Soleil, où la fusion concerne de l'hydrogène, les tokamaks se nourrissent de deutérium et de tritium, formes d'hydrogène plus lourdes (et radioactive dans le cas du tritium), qui fusionnent plus facilement. Lors de la fusion, des neutrons de très haute énergie sont émis, dont il faut pouvoir capter l'énergie sans qu'ils endommagent la machine.

●●● *Plusieurs kilogrammes d'hydrocarbures contenant du tritium pourraient ainsi s'accumuler dans la machine.* » Cette présence de tritium radioactif serait dangereuse à l'ouverture du tokamak. De plus, la formation d'hydrocarbures peut perturber le plasma. Il est donc indispensable de mettre en œuvre un matériau encore plus résistant. C'est le tungstène qui a été choisi. Le projet West – d'une durée annoncée de sept ans – vise à tester ce nouveau divertor sur Tore Supra... à condition de trouver les financements.

Une fois Iter en service, il ne sera pas question d'y envoyer des réparateurs au moindre pépin, car « ouvrir » la machine, c'est l'arrêter pendant presque un an ! Vu le coût de fonctionnement (265 millions d'euros par an), mieux vaut prévoir des moyens d'inspection et de répa-

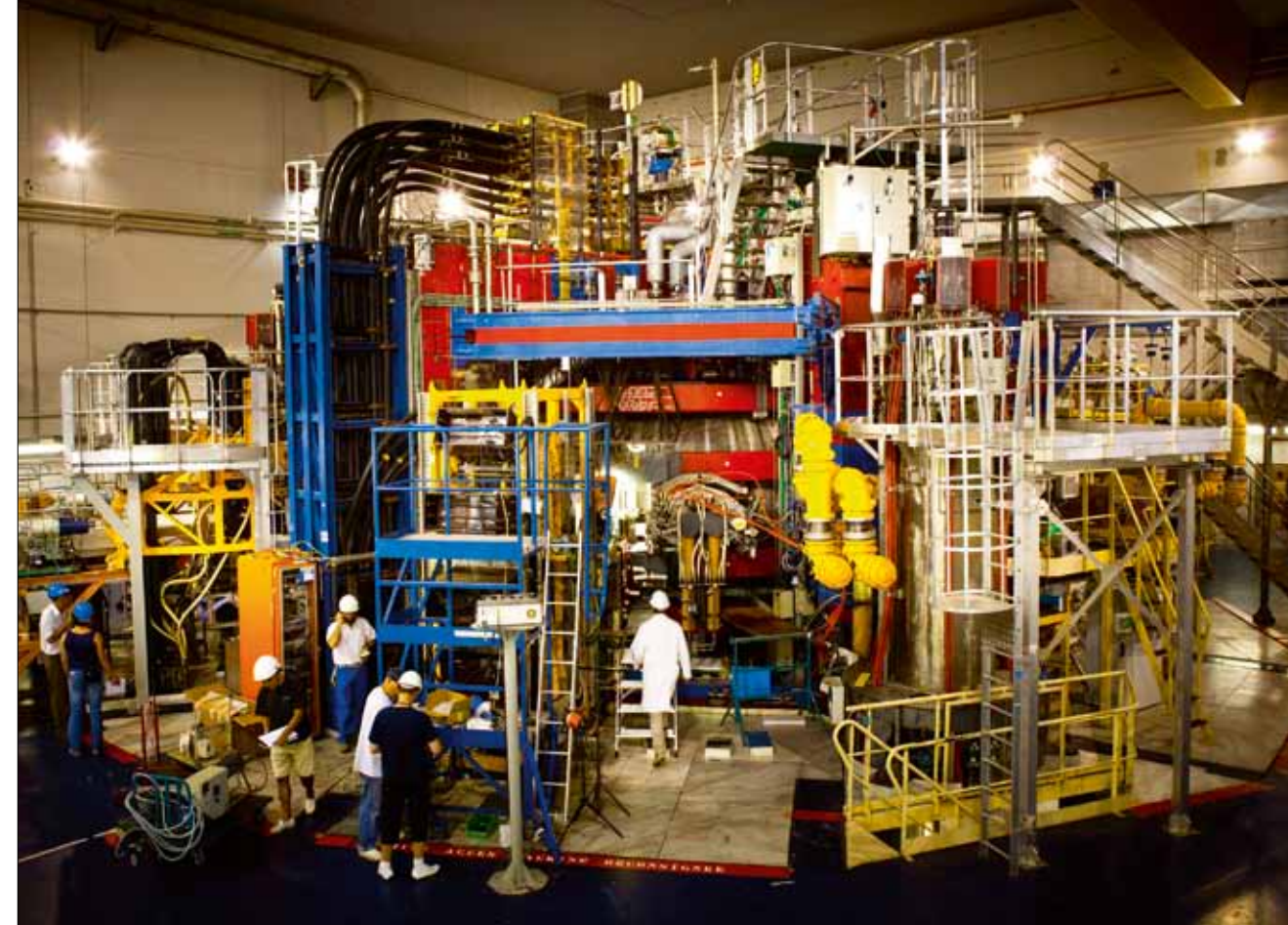
ration permettant de garder le tokamak dans les conditions standard : 120 °C et un dix-milliardième de la pression atmosphérique. Vincent Bruno, chercheur au Commissariat à l'énergie atomique (CEA) à Cadarache, nous présente le robot qu'il a conçu pour intervenir dans Iter. De sa « niche » – une « enceinte de guidage » de 11 mètres de long – sort un grand serpent formé de cinq segments bourrés d'électronique et reliés par des articulations capables de tourner horizontalement à plus ou moins 90°, et verticalement à plus ou moins 45°. Ce robot de 8 mètres de long embarque une caméra panoramique capable de zoomer sur les parties à inspecter. « Le robot doit supporter des températures de 200 °C en mode éteint, et 120 °C en fonctionnement, indique Vincent Bruno. Seule la caméra est refroidie. Pour le reste,

nous utilisons des composants électroniques « durcis » conçus par les militaires. » Le chercheur teste aujourd'hui de nouveaux outils de diagnostic, notamment pour localiser les fuites d'eau de refroidissement, et des méthodes de prélèvement d'échantillons.

### En 3 D et en taille réelle

Encore plus étonnante est la création au sein de l'IRFM d'une salle de réalité virtuelle. Objectif : vérifier à l'avance que tout se passera bien lors de la construction et du fonctionnement d'Iter. « Ce n'est pas au moment où l'on assemble deux composants qu'il faut s'apercevoir qu'ils sont incompatibles », rappelle Delphine Keller, en actionnant un « bras haptique », ou bras à retour d'effort. Ce dernier permet de simuler une résistance mécanique, par exemple lorsqu'on cogne deux objets. On peut ainsi effectuer virtuellement des opérations de montage, vérifier que l'opérateur peut accéder à la zone de travail ou que son outil est adapté. « Cela permettra de gagner du temps lors du montage réel », observe la chercheuse. Dans cette salle de réalité virtuelle, le futur Iter est reproduit en taille réelle et en 3D. L'effet est saisissant. Mais si l'on prend conscience du gigantisme de la machine, cette maquette interactive permet également de repérer certaines erreurs d'aménagement : tuyaux qui se chevauchent, zones de travail trop étroites ou situées en hauteur et inaccessibles... « Notre but est de dépister les problèmes en amont, avant que le design ne soit figé, souligne Delphine Keller. Nous détectons les contraintes et les intégrons dans la conception des composants. » Bientôt, grâce à une adaptation de la Kinect (un accessoire de jeu de Microsoft permettant de contrôler les jeux vidéo sans manette), les opérateurs pourront se déplacer virtuellement dans Iter. Leurs mains bénéficieront d'un système de simulation très précis, afin de vérifier en détail les opérations de montage.

Si tout se passe comme prévu, la construction du réacteur devrait s'achever en 2018 et les premiers plasmas se former en 2019. Les chercheurs vérifieront le fonctionnement de la machine en testant



la durée et la puissance des plasmas, sans élément radioactif dans un premier temps. Le tritium sera introduit vers 2026, et les scientifiques espèrent alors atteindre le graal : produire dix fois plus de puissance que ce qu'ils injectent, soit 500 mégawatts pour 50 mégawatts consommés, pendant au moins... 400 secondes. « Dans une deuxième phase, nous essaie-

**C'est dans les tuyaux de Tore Supra que sont réalisées toutes les expériences qui préparent l'exploitation d'Iter.**

rons d'obtenir un facteur d'amplification de seulement 5, mais sur une durée plus longue : une heure », espère Alain Bécoulet.

### En première ligne face au plasma

Mais même en cas de réussite, le succès de la fusion n'est pas garanti : encore faut-il qu'elle soit rentable commercialement, ce qui dépend notamment de la vitesse

d'usure des composants. S'il faut changer tous les six mois le matériau situé « en première ligne » face au plasma, il y a peu de chances que la fusion soit industrialisable. Quant aux matériaux de structure, moins sollicités, ils doivent tenir pendant toute la durée de vie du réacteur. Or, ils reçoivent des neutrons qui « bousculent » leurs atomes et créent des bulles d'hélium gazeux qui les endommagent. Actuellement, le métal choisi, « l'eurofer », ne pourrait résister que pendant le tiers de la vie du réacteur. Il faut donc l'améliorer. De la capacité des chercheurs à résoudre cette question du matériau de structure dépendra l'avenir de la fusion. Si Iter finissait par faire ses preuves, un réacteur prototype, Demo, serait construit vers 2040, dans le but d'évaluer la faisabilité industrielle de la fusion. Il comprendrait une centrale de génération de vapeur et serait capable de produire de l'électricité grâce à la chaleur récupérée du plasma (ce qui n'est pas le cas d'Iter). Le dernier défi à relever par Demo sera probablement le plus ardu : vérifier que la fusion est rentable par rapport aux autres énergies, qui auront d'ici là fortement progressé... ■

## Une cible chauffée à 200 millions de degrés !

Confiner les atomes à l'aide d'un champ magnétique n'est pas le seul moyen de les faire fusionner. Les lasers peuvent jouer le même rôle. Le National Ignition Facility (Nif) en Californie a été construit notamment dans ce but. Ses 192 puissants lasers ultraviolets concentrent leur énergie sur une minuscule cible de deutérium et de tritium, dans le but de la chauffer à plus de 200 millions de degrés. Le 5 juillet dernier, ces lasers ont atteint 1,85 million de joules pendant quelques milliardièmes de seconde, délivrant une puissance de 500 terawatts (500 milliards de kilowatts, mille fois plus que la puissance utilisée par tous les Etats-Unis pendant ce court laps de temps) sur une cible de 2 millimètres de diamètre. Mais il reste de nombreux défis à relever. Tout d'abord, il

faudra construire les cibles pour un coût très faible, et les placer dans une chambre de réaction toutes les 20 millisecondes. Une chambre qui devra être capable de recueillir l'énergie de la fusion, mais aussi ses déchets. D'autre part, il faudra répéter les tirs de laser plusieurs fois par seconde, alors qu'en mars dernier, il fallait attendre... 36 heures après le record pour que les lasers soient de nouveau utilisables. Enfin, le Nif, tout comme son homologue français le Laser mégajoule (LMJ) à Bordeaux, sont des équipements destinés avant tout à tester les armes nucléaires, et ne peuvent qu'apporter une preuve de principe de la faisabilité de la fusion. Pour aller plus loin, il faudrait créer un nouvel équipement spécifique. Aucun pays ne souhaite aujourd'hui s'y lancer.