

performance en matière de puissance de fusion. En France, *Tore Supra*, devenu *West* après une vaste campagne d'améliorations, a un programme complémentaire et plus technologique avec l'utilisation d'aimants supraconducteurs et de composants du tokamak capables d'encaisser en continu la forte chaleur produite par le plasma. L'avantage des aimants supraconducteurs est évident. Pour confiner le plasma, il faut des champs magnétiques intenses, or les aimants conventionnels chauffent par effet Joule (les électrons qui y circulent entrent en collision avec les atomes et libèrent de l'énergie sous forme de chaleur) et ne peuvent donc maintenir un courant élevé très longtemps. Certains matériaux, quand ils sont refroidis à des températures proches du zéro absolu (environ $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$), deviennent supraconducteurs, et les électrons circulent avec une résistance nulle. Il n'y a plus d'effet Joule. Il est alors possible d'y faire circuler un courant électrique plus important pour avoir un champ magnétique plus intense et de le maintenir plus longtemps.

Les résultats obtenus par ces différentes expériences (citons aussi *Doublet III-D*, aux États-Unis, ou *Asdex-Upgrade*, en Allemagne) ont permis d'optimiser la conception de la génération suivante de tokamaks, représentée par *Iter*, pour atteindre le meilleur rendement possible.

Comment définit-on le rendement ?

Ce paramètre est souvent source de confusion dans la communication auprès du grand public. Le rendement ultime ou commercial, celui qui aura de l'importance lorsque nous en serons au stade de la commercialisation est le rendement « de la prise à la prise ». Il faut bien voir qu'un réacteur à fusion est avant tout un amplificateur de puissance, ce qui n'est pas le cas d'un réacteur à fission. Dans ce dernier, on met de la matière, l'uranium par exemple, et on récupère de l'énergie. Dans une centrale à fusion, il est nécessaire d'injecter de l'énergie et de la matière pour obtenir une plus grande quantité d'énergie. L'énergie injectée sert à chauffer le plasma, mais il faut aussi de l'énergie pour alimenter les aimants, pour refroidir ces derniers, etc. Il y a donc bien une notion de rendement dans les réacteurs à fusion : c'est le rapport de la puissance électrique produite et de la puissance consommée par la centrale.

Quand on aura des réacteurs commerciaux, on prendra par exemple 100 mégawatts sur le réseau et on y restituera 1000 mégawatts. On aura alors un rendement commercial de 10. Mais les tokamaks actuels, et c'est aussi le cas de celui d'*Iter*, sont des installations de recherche, au moins une étape avant la commercialisation. Le réacteur d'*Iter* ne sera pas connecté à des turbines, entraînées par de la

vapeur d'eau chauffée à partir de l'énergie extraite du plasma, pour produire de l'électricité. On s'intéresse donc au « rendement plasma », qui est simplement le rapport de la puissance produite à celle injectée dans le plasma pour le chauffer.

L'objectif d'*Iter* est d'atteindre un rendement plasma de l'ordre de 10. Son second objectif est de montrer que le dispositif peut maintenir un plasma pendant de longues périodes, puisque à terme une centrale devra tourner pendant des jours sans interruption.

Alors qu'*Iter* n'est pas encore opérationnel, plusieurs résultats dans le domaine de la fusion ont été annoncés ces derniers mois.

De quoi s'agit-il ?

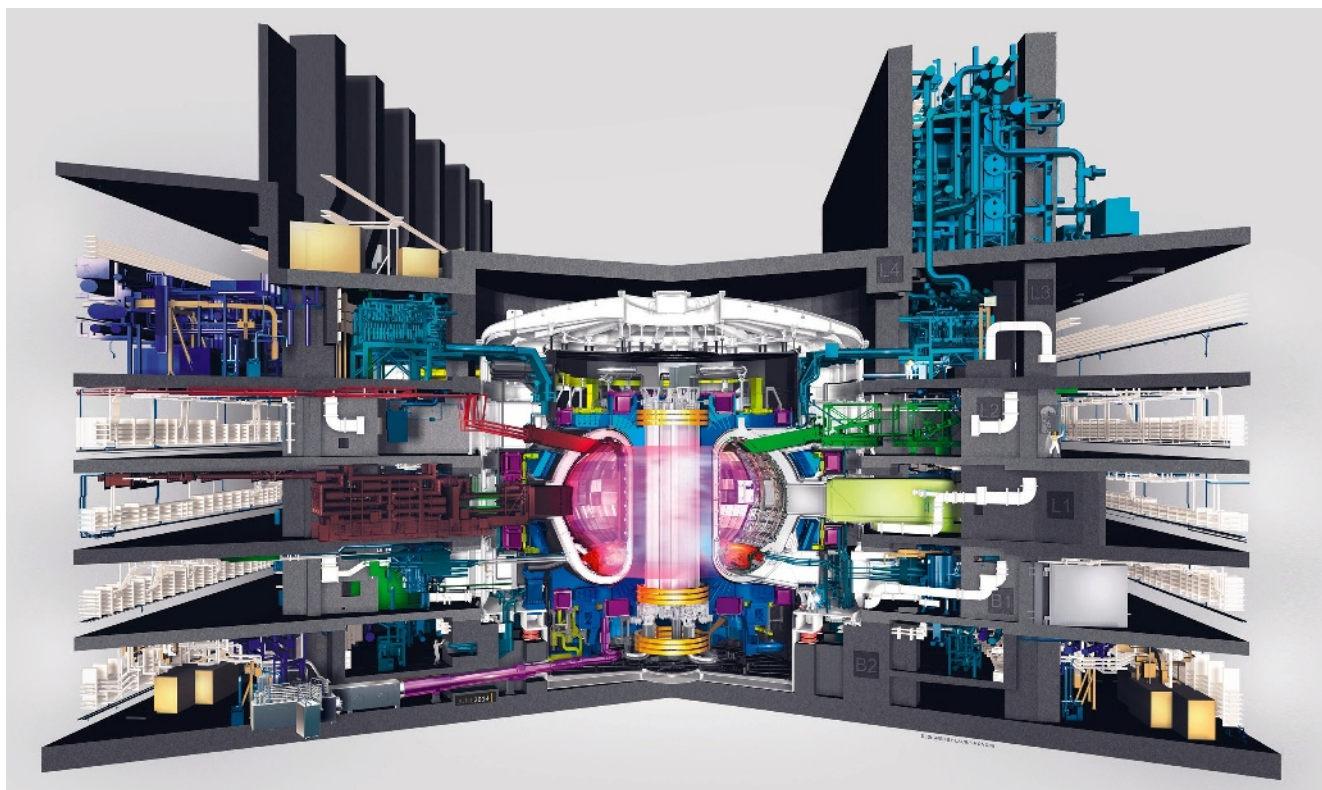
Avant de parler des tokamaks, commençons par saluer le résultat du NIF, l'organisme de fusion inertielle américain. En août 2021, l'installation située au laboratoire Lawrence-Livermore, en Californie, a atteint un « rendement plasma » de 70 % en produisant 1,3 mégajoule en quatre milliardièmes de seconde. La fusion inertielle se confronte à des défis techniques très différents des tokamaks et c'est enthousiasmant de voir que cette piste avance aussi.

Les tokamaks ne sont pas en reste. En 1997, *Jet* avait établi un record de 16 mégawatts pendant 0,15 seconde et avec un rendement proche de 100%. En août 2021, le même réacteur a maintenu une puissance de 10 mégawatts, mais pendant 5 secondes. Cela a permis une production d'énergie record de 59 mégajoules (qui correspond au produit de la puissance par la durée). Comme l'énergie injectée dans le plasma pour le chauffer était de l'ordre de 200 mégajoules, on a un rendement record de 25%.

Le tokamak *Jet* ne peut pas maintenir ce régime plus longtemps pour des raisons techniques. Il n'est pas équipé d'aimants supraconducteurs et il n'a pas de systèmes de refroidissement assez efficaces pour évacuer l'énergie produite. Mais c'est là que le résultat du tokamak chinois *East* (*Experimental Advanced Superconducting Tokamak*) est encourageant. En fin d'année 2021, le dispositif a maintenu un plasma à environ 70 millions de degrés pendant 1056 secondes, soit plus de 17 minutes. Il bat ainsi le record jusque-là détenu par *Tore Supra* de 390 secondes en 2003. Cette performance est une belle démonstration de la synergie mondiale. Les aimants d'*East* ont bénéficié d'un transfert de technologie en provenance de *Tore Supra*. Les équipes d'*East* ont amélioré le concept et les résultats sont au rendez-vous.

Évidemment, si on regardait le rendement d'*East*, il serait extrêmement faible, mais ce n'était pas l'objectif de cette expérience. C'est cette répartition des problèmes à traiter entre les différents tokamaks qui nous permet de conclure

On a une sorte de galaxie, avec une grosse étoile, « Iter », entourée d'une myriade de projets plus modestes



que le faisceau récent d'avancées est de bon augure pour *Iter*, dont la conception est une sorte de synthèse de ces diverses expériences. Et, par ailleurs, ces dernières expériences continuent de nous apporter des informations pour optimiser encore la configuration d'*Iter*.

Venons-en donc à *Iter*.

Quand le projet a-t-il débuté ?

Iter est l'acronyme anglais pour «réacteur thermonucléaire expérimental international» et signifie «chemin» en latin. Il associe 35 pays : les pays de l'Union européenne, l'Inde, le Japon, la Chine, la Russie, la Corée du Sud, les États-Unis, la Suisse et le Royaume-Uni. Le projet a été discuté dès 1985, notamment lors d'une rencontre entre le président américain Ronald Reagan et le dirigeant soviétique Mikhaïl Gorbatchev. L'acte de naissance est signé en 1988. Une longue phase de conception s'ensuit et s'étend sur plusieurs années. En 2005, le site de Cadarache, dans le sud de la France, est officiellement retenu pour accueillir le réacteur.

La construction du bâtiment du tokamak a commencé en 2013. Actuellement, la structure en béton est terminée, une partie des systèmes cryogéniques, électriques et de refroidissement sont en place. L'assemblage de la machine a démarré. Ce projet est souvent comparé au programme *Apollo*, de la Nasa, par son envergure et sa complexité. Près de cinq cents entreprises sont impliquées dans sa construction. Les pièces du tokamak sont

Schéma du tokamak d'*Iter*.
En mauve, l'anneau de plasma dans la chambre à vide. La machine et son cryostat pèsent 23 000 tonnes, soit l'équivalent de 3,5 fois la masse de la tour Eiffel.

fabriquées dans différents pays (Corée du Sud, Japon, Italie...) et doivent être transportées sur place. Il faut gérer ce puzzle tridimensionnel avec un chantier qui s'étend sur plus de dix ans. D'un point de vue technique, la machine repose sur des technologies de pointe : on parlait de la cryogénie, mais c'est aussi le cas pour le contrôle du plasma, son chauffage, la qualité des matériaux, etc.

Quelles sont les dimensions du dispositif d'*Iter* ?

Le réacteur est intégré dans un complexe de trois bâtiments sur une hauteur de 60 mètres et une largeur de 120 mètres. Le tokamak en lui-même est composé de différentes parties. La chambre à vide toroïdale pèse près de 5 000 tonnes pour un diamètre externe de 19,4 mètres et un rayon interne de 6,5 mètres. La hauteur maximale est de 11,3 mètres. La chambre peut accueillir 800 mètres cubes de plasma.

Il faut ajouter trois systèmes d'aimants. Les 18 aimants toroïdaux verticaux s'enroulent autour de la chambre à vide. Ils produisent les lignes de champ qui confinent le plasma avec un champ magnétique qui s'élève à 5,3 teslas dans le plasma. Cependant, avec ce seul champ, on constate que les particules du plasma subissent une déviation verticale. La courbure du champ magnétique exerce une sorte de force «centrifuge» : les électrons partent dans une direction et les noyaux dans l'autre. Cette séparation des charges conduit à une perte rapide du confinement. Le problème a été