

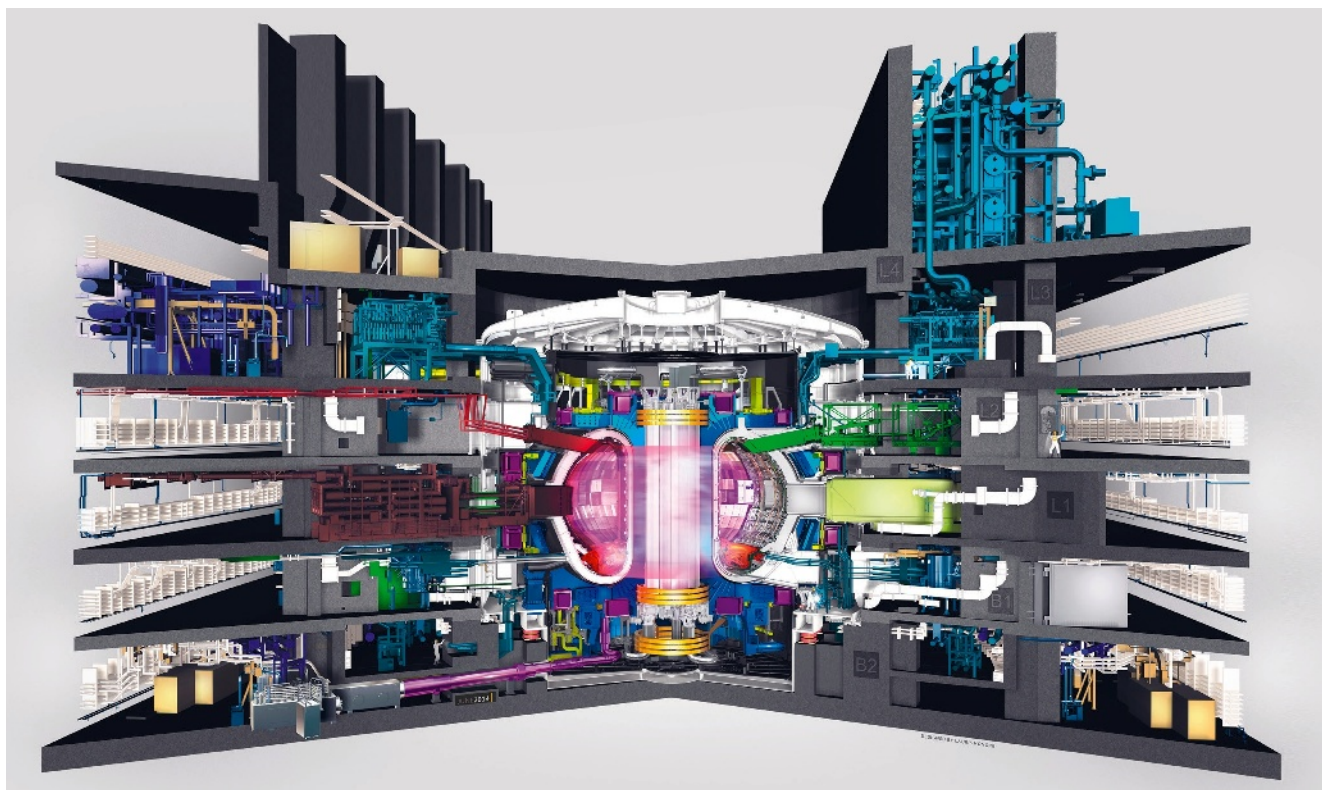


Schéma du tokamak d'ITER.
En mauve, l'anneau de plasma dans la chambre à vide. La machine et son cryostat pèsent 23 000 tonnes, soit l'équivalent de 3,5 fois la masse de la tour Eiffel.

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 cinquante entreprises sont impliquées dans sa construction. Les pièces du tokamak sont

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

résolu par les chercheurs soviétiques dans les années 1950. Un solénoïde de 18 mètres de hauteur pour 4,3 mètres de diamètre et un poids de 1 000 tonnes passe par l'axe central du tore : il crée un courant induit qui circule dans le plasma et s'oppose à la dérive des particules.

Pour compléter le dispositif, six aimants dits « poloïdaux » entourent l'ensemble dans le plan horizontal. Les plus grands (24 mètres de diamètre) ont dû être construits sur place. Leur rôle est de déformer le plasma pour éviter qu'il n'entre en contact avec l'enceinte et d'améliorer sa stabilité.

Le plasma n'en reste pas moins un milieu très instable où peuvent naître des « disruptions ». Ces coups de foudre conduisent à la perte totale du confinement mais peuvent aussi endommager le revêtement des parois de la chambre. Des systèmes sont à l'étude pour limiter leur occurrence et amortir leur impact.

Comment le plasma est-il chauffé ?

Pour atteindre les 150 millions de degrés nécessaires à la fusion du deutérium et du tritium, plusieurs dispositifs participent au chauffage. Le courant induit par le solénoïde contribue grâce à l'effet Joule. Il est complété par des systèmes de chauffage externe. Le premier consiste à injecter des atomes de deutérium neutres à très haute énergie (plus « chauds » que le plasma) dans le plasma. Lors de collisions dans le plasma, ces atomes s'ionisent et transfèrent leur énergie au plasma, ce qui conduit à augmenter la température. Le système suivant reprend le principe du four à microondes. Des ondes de fréquences comprises entre 40 et 55 mégahertz excitent les ions du plasma.

Un dernier dispositif émet des ondes à 170 gigahertz pour exciter les électrons. Un grand intérêt de ce système est que l'excitation est directionnelle. Il prend le relais du solénoïde central qui ne peut fonctionner en continu et se décharge progressivement. En accélérant les électrons dans une seule direction, ce système entretient le courant électrique dans le plasma, assurant sa stabilité. Il accroît aussi l'effet Joule et donc chauffe le plasma. Si l'idée peut sembler simple sur le papier, des dizaines d'années ont été nécessaires pour mettre au point tous ces systèmes dans le réacteur afin d'optimiser leur consommation en énergie !

En plus du chauffage, quels sont les défis techniques liés au combustible ?

Le réacteur d'Iter réalisera la fusion du deutérium et du tritium. Le premier isotope, stable, se trouve par exemple dans l'eau de mer (il représente 1 atome d'hydrogène sur 6 400 dans les molécules d'eau). Un processus de distillation est nécessaire mais il est facilement accessible. Le tritium a quant à lui une période de demi-vie de 12,3 ans, il n'existe pas à l'état naturel. Pour Iter,



il sera produit ailleurs (ce qui coûte cher) et directement injecté dans la chambre à vide.

À terme, l'idée est de produire le tritium directement dans le réacteur. La fusion du deutérium et du tritium produit des neutrons qui échappent au champ magnétique. En tapissant les parois de la chambre avec du lithium, la capture d'un neutron par cet élément produit du tritium et de l'hélium. Iter aura recours à des modules dits « tritigènes », intégrés à la paroi pour tester ce mode de production.

Le lithium est relativement abondant sur Terre, mais il n'existe pas encore de grande filière pour son exploitation, même si cet élément suscite de plus en plus d'intérêt notamment dans le secteur des batteries. Il reste donc à inventer à une filière d'extraction efficace et respectueuse de l'environnement.

L'émission de neutrons n'est-elle pas problématique ?

Si le combustible de la fusion ne devient pas lui-même radioactif, l'émission de neutrons de haute énergie peut activer certains atomes des parois de la chambre à vide et rendre ces matériaux radioactifs. Par exemple, un élément problématique est le chrome 59 stable, qui se transforme en chrome 60. Il faut donc choisir des matériaux d'une grande qualité et dénués d'éléments susceptibles d'être activés.

Globalement, la radioactivité produite par ces neutrons est beaucoup plus faible que dans les réacteurs à fission. On obtient des déchets avec des durées de vie d'au plus quelques dizaines d'années. Néanmoins, pour Iter, nous avons intégré toutes les procédures et normes de la sûreté nucléaire, avec la maintenance opérée par des robots pour aller chercher les pièces à remplacer, etc. Le démantèlement a aussi été pris en compte.

Sur une plateforme de 42 hectares, le complexe hébergeant le tokamak d'Iter (au centre de l'image ci-dessus) est entouré d'un grand nombre de bâtiments destinés aux systèmes annexes : le poste électrique, la zone d'évacuation de la chaleur, les bâtiments de conversion du courant alternatif-continu, l'usine cryogénique, etc. À l'intérieur du complexe, le puits d'assemblage de 30 mètres de diamètre et autant de profondeur accueillera le réacteur d'Iter (photo de droite). Plusieurs éléments sont déjà en place : diverses parties du cryostat et deux bobines du champ poloïdal. La structure cylindrique qui s'élève au centre est temporaire. Elle servira de support pour l'installation des neuf modules correspondant chacun à une portion de 40° de la chambre à vide et équipé de deux bobines du champ toroïdal (qui en a 18 en tout). Une fois ces éléments assemblés, le cylindre sera retiré et remplacé par le solénoïde central.