

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.



Pour la question du vieillissement des matériaux soumis à une irradiation intense de neutrons, une importante activité de recherche et de développement est toujours en cours pour trouver les meilleures solutions pour les successeurs d'*Iter*. Des dispositifs expérimentaux sont en cours de préparation en Espagne et au Japon sur cette question.

#### Existe-t-il des pistes de réacteurs sans émission de neutrons ?

Effectivement, une firme comme TAE Technologies explore la piste de la fusion hydrogène-bore 11. Elle ne produit pas de neutrons, mais il faut chauffer dix fois plus le plasma que pour *Iter*. Or à de telles températures, les électrons commencent à perdre de l'énergie par rayonnement. Cela devient difficile de trouver les bons paramètres pour une configuration stable.

Mais même si ce projet n'aboutissait pas, je considère que toutes ces initiatives sont très intéressantes. On assiste à une véritable accélération dans le secteur de la fusion. On a une sorte de galaxie, avec une grosse étoile, *Iter*, entourée d'une myriade de projets plus modestes, qui ont leur utilité. Les ingénieurs et chercheurs attirés dans ces entreprises trouveront peut-être des solutions à des problèmes, mettront au point des méthodes d'optimisation qui seront intégrées aux successeurs d'*Iter*. L'expérience acquise par ces firmes sera aussi utile pour une étape clé : celle de la transition de réacteurs essentiellement destinés à la recherche vers des solutions commerciales.

#### Quel est le calendrier pour les années à venir ?

L'assemblage du dispositif d'*Iter* était en bonne voie mais a été, et est encore, très

perturbé par l'épidémie de Covid. Certaines usines où sont fabriqués les éléments du réacteur ont fermé pendant plusieurs mois ou ont opéré au ralenti. Le transport maritime est aussi très compliqué. La logistique sur le site de Cadarache est actuellement très difficile.

Le premier plasma sans fusion était prévu pour 2025. Nous aurons probablement du retard. En revanche, grâce à une planification modifiée, comme un jeu de Tetris, je suis assez optimiste pour le premier plasma deutérium-tritium en 2035 comme prévu.

Après *Iter*, son successeur, le réacteur *Demo* (*Demonstration power plant*, en anglais), pourrait démarrer dès 2050. L'objectif de ce projet est de démontrer qu'il est possible de produire de l'électricité avec un rendement commercial intéressant.

#### 2050... c'est bientôt !

Absolument. Il faut bien voir que la mission d'*Iter* est de défricher un vaste terrain avec de nombreuses problématiques à résoudre : les dimensions du réacteur, combiner l'expertise acquise à travers le monde, la sûreté nucléaire, etc. On reproche souvent à ce projet ses retards de calendrier et le dépassement de budget. Le défi était hors norme et trop difficile à évaluer pour en prendre toute la mesure à son commencement dans les années 1980. La bonne nouvelle est que nous touchons au but.

#### Dans le futur, quelle sera la place de la fusion nucléaire dans la production d'énergie ?

La priorité, c'est d'arrêter d'utiliser les ressources fossiles (le gaz, le charbon et le pétrole) pour limiter les émissions des gaz à effet de serre. Aujourd'hui, nous avons différentes solutions : des énergies renouvelables (éolien, solaire, hydraulique) et la fission nucléaire.

Notre travail actuel consiste à développer une technologie supplémentaire pour offrir une option de plus dans le mix énergétique. Ce qui est assez clair, c'est que la fusion ne remplacera pas toutes les autres sources d'énergie. Elle n'a probablement pas vocation à être déployée partout, mais elle pourrait très bien être connectée au réseau près de grandes villes ou dans des bassins industriels.

La fusion présente de nombreux atouts : les réserves de combustibles seraient abondantes ; il n'y a aucun risque d'emballement ou d'explosion (si on arrête de chauffer le plasma, la réaction cesse) ; dans un réseau intelligent, les réacteurs à fusion peuvent être pilotés (allumés ou éteints) bien plus facilement que les réacteurs à fission ; les déchets radioactifs sont limités et peu dangereux, etc. Il reste à surmonter de nombreux défis techniques pour maîtriser pleinement cette source d'énergie.

*Propos recueillis par Sean Bailly*

#### BIBLIOGRAPHIE

A. Bécoulet, *L'Énergie de fusion*, Odile Jacob, 2019.

A. Creely et al., *Overview of the SPARC Tokamak*, *Journal of Plasma Physics*, 2020.

P. Rodriguez-Fernandez et al., *Overview of the SPARC physics basis towards the exploration of burning-plasma regimes in high-field, compact tokamaks*, *Proceedings of the 28th IAEA Fusion Energy Conference*, 2020.