

ITER : VERS LE CHEMIN DES RÉACTEURS DE FUSION

1. INTRODUCTION

Grâce aux études de recherche et de développement réalisées notamment en Europe et au Japon, les progrès dans le domaine de la fusion des noyaux des atomes se sont accélérés dans les années 80. La communauté des chercheurs, forte des résultats obtenus aussi bien en physique nucléaire qu'en technologie, s'engage avec ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor* – le « chemin », en latin) vers une énergie abondante, avec la réalisation d'un réacteur industriel thermogène. Cette installation est en effet destinée à vérifier la « faisabilité scientifique et technique de la fusion nucléaire comme nouvelle source d'énergie ». Elle ne produira donc pas d'électricité, mais seulement de la chaleur. Et c'est aussi un moteur formidable de développements technologiques, comme les aimants supraconducteurs, qui permettent d'obtenir des images fines du cerveau par résonance magnétique.

2. EN QUOI CONSISTE ITER ?

ITER est une machine expérimentale exploitant la fusion nucléaire, phénomène dans lequel des noyaux légers comme les deux isotopes de l'hydrogène (tritium et deutérium) fusionnent lorsqu'ils sont portés à des températures de plusieurs millions de degrés. Ce phénomène dégage de grandes quantités d'énergie sous forme de neutrons de très grande énergie et de particules d'hélium ionisé (*les particules alpha*). C'est ce type de phénomène qui existe en permanence au sein des étoiles.

ITER s'inscrit dans la filière énergétique de fusion nucléaire par confinement magnétique qui tire son nom du mode de confinement des particules du *plasma* (gaz de deutérium et de tritium ionisé) par des champs magnétiques puissants, confinés dans un tore (procédé TOKAMAK). [NB : Un autre mode de confinement est désigné comme « inertiel », la densité étant obtenu par de puissants lasers (voir [article GAENA N° 23 : « La fusion par confinement inertiel »](#))].

Au moment où le monde prend de plus en plus conscience des problèmes d'approvisionnement en énergie et de l'impact environnemental des énergies carbonées, et même si les réacteurs de fusion ne figureront pas avant longtemps dans le panel des sources d'énergie, la possibilité de disposer, dans le futur, de réacteurs de grande puissance, dont les ressources en combustible sont abondantes et accessibles à tous, rend cette filière très attractive.

La fusion, de par sa physique, possède une sûreté intrinsèque qui la met à l'abri d'un accident nécessitant l'évacuation des populations. Ses déchets radioactifs sont de durée de vie moyenne. La quantité de combustible mise en jeu est très faible (1 g de tritium équivaut 10 tep (tonne-équivalent pétrole)). Cet engouement ne doit pas cacher qu'il y a un challenge à relever, car d'autres étapes difficiles devront être franchies pour en arriver au stade final du réacteur industriel, même si certaines caractéristiques de l'installation ITER sont déjà proches de l'échelle.

En particulier, les études de résistance des matériaux aux neutrons très énergétiques de la fusion nucléaire sont indispensables pour assurer la construction de la machine d'après ITER qui – elle – sera électrogène : **DEMO**. L'accélérateur de particules IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility), qui est construit au Japon, devra permettre de relever ce défi en parallèle avec l'exploitation d'ITER.

3. QUELS SONT LES OBJECTIFS D'ITER ?

Dans le cas d'ITER, la fusion se fera entre des noyaux de deutérium et de tritium, tous deux isotopes de l'hydrogène (isotopes : se dit de noyaux contenant un nombre différent de particules sans changer les propriétés chimiques de l'atome correspondant, ici, l'hydrogène : en quelque sorte des jumeaux d'un poids différent). La

réaction donne de l'hélium ionisé (particules alphas de 3,5 MeV) et des neutrons de très grande énergie (14 MeV).

Le principe paraît simple mais n'est-il pas présomptueux de prétendre obtenir et utiliser des énergies aussi fantastiques ?

En effet, il faut atteindre des conditions peu ordinaires pour initier la fusion de noyaux légers qui, par nature, ont tendance à se repousser du fait des forces électrostatiques, plutôt qu'à s'assembler. Pour vaincre cette barrière, il faut lancer les particules à très grande vitesse et donc leur fournir une énergie considérable, ce qu'on sait faire également dans les accélérateurs de particules, comme au CERN.

Dans ITER, les vitesses attendues pour les ions deutérium et tritium devraient être de l'ordre de quelques milliers de kilomètres/seconde et, pour éviter d'utiliser des unités d'énergie peu familières, disons que les températures au centre du plasma seraient de l'ordre de la centaine de millions de degrés, mais avec des densités et des pressions très faibles.

Le confinement magnétique du plasma, indispensable pour maintenir la température à un niveau suffisant au sein de celui-ci, représente un défi considérable, car il faut mettre en œuvre des électro-aimants gigantesques. Ces aimants seront maintenus à une température de $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ (soit $4\text{ }^{\circ}\text{K}$) par circulation d'hélium liquide, pour bénéficier du phénomène de supraconductivité et limiter ainsi drastiquement la consommation d'énergie.

La figure 1 ci-dessus montre un éclaté d'ITER. La forme géométrique du Tokamak est simple : c'est un tore (forme similaire à la chambre à air d'un pneu). Le petit et le grand rayon du plasma confiné dans cette chambre sont respectivement voisins de 2 m et 6 m (1), mais les dimensions de la chambre à vide sont bien plus grandes : volume 1000 m^3 , diamètre externe 19 m, hauteur 11 m. Les particules ionisées s'enroulent suivant des lignes de champ en forme de spirale, sans toucher les parois.

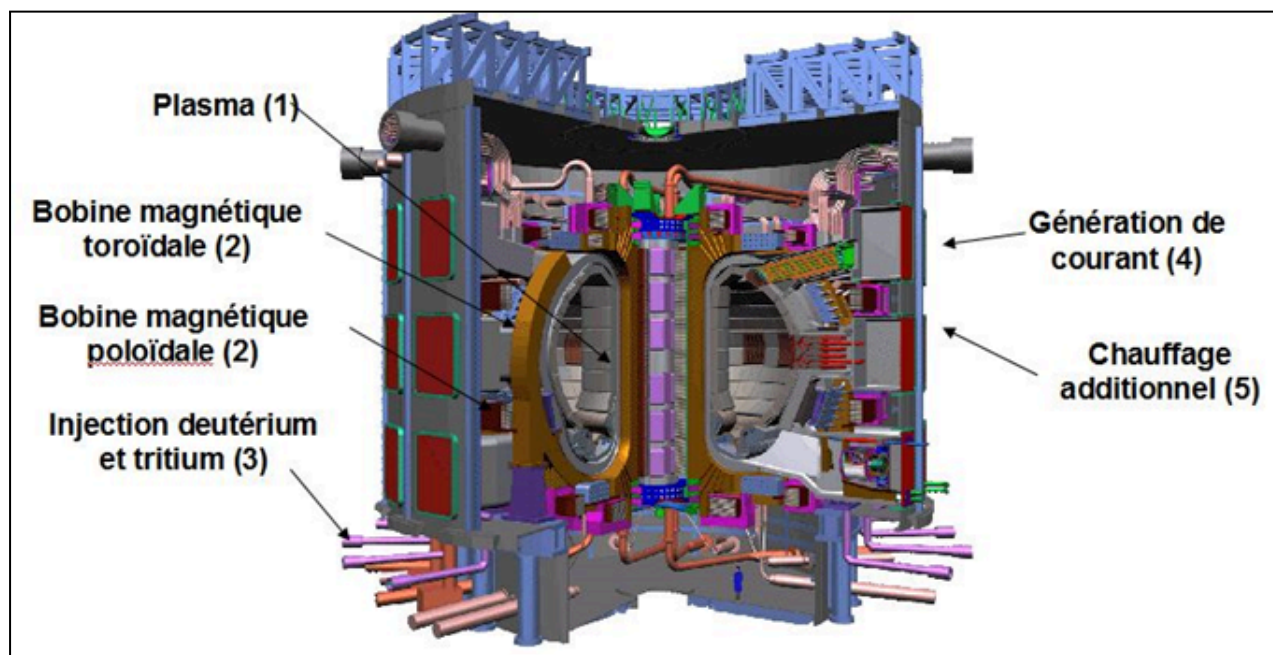


Figure 1 : Eclaté d'ITER

Lorsque les champs magnétiques (2) sont établis et quand les réactifs, deutérium et tritium, sont introduits dans la chambre (3) préalablement amenée à un vide poussé, le plasma est obtenu sous l'effet d'une tension électrique élevée et d'une génération de courant (4) grâce au solénoïde central qui n'apparaît pas sur le schéma éclaté. Des systèmes additionnels (5) apportent l'énergie nécessaire pour entretenir les réactions de fusion.

Ce projet sera une réussite si les deux objectifs suivants sont atteints :

- Démontrer l'auto-entretien des réactions de fusion par les particules alpha en générant une puissance de 500 mégawatts en n'en consommant que 50, durant près de 7 minutes (400 secondes), soit une énergie générée de 200.000 mégajoules. Le record mondial, réalisé par le Tokamak européen JET, est, à ce jour, de 69 mégajoules générés en 6 secondes par une puissance fournie de 25 MW.
- Maintenir les réactions de fusion dans le plasma pendant au moins 1000 secondes (près de 17 minutes). C'est le record de durée atteint par le tokamak chinois EAST en décembre 2021, battant largement la performance précédente de Tore Supra (6 minutes et demie).

4. COMMENT RÉCUPÉRER LA CHALEUR ?

L'expérience ITER n'a pas pour objectif de récupérer l'énergie émise par le plasma sous forme de neutrons rapides et de particules alpha totalement ionisées. Pour cela, il est nécessaire, au préalable, de mettre au point les matériaux absorbants les flux de particules émises qui devront résister longtemps aux conditions expérimentales : c'est l'objet du programme IFMIF mené au Japon en parallèle avec ITER. Ce sera un des objectifs de DEMO.

Une méthode possible consisterait en une première barrière de lithium liquide régénérant du tritium et protégeant la seconde barrière, qui – elle – est solide.

5. QUELLES SONT LES SOURCES DE DEUTÉRIUM ET DE TRITIUM ? SONT-ELLES INÉPUISSABLES ?

Le coût du combustible intervient peu dans le coût du kWh. De plus, les quantités nécessaires sont faibles et, si besoin, en partie recyclables.

Le deutérium est abondant dans l'eau de mer (33 g/m³), le tritium sera à terme produit à partir du lithium, abondant dans la croûte terrestre et dans les océans. Dans le cas d'ITER, le deutérium et le tritium sont préparés et approvisionnés hors de l'enceinte de réaction. Ils sont introduits au fur et à mesure à partir de réservoirs sous pression.

Toutefois, des expériences de génération de tritium à partir de lithium-6 seront effectuées dans ITER avec des modules-tests de couverture fournis par les différents pays partenaires. En effet, lorsqu'il capture un neutron, le noyau de lithium se désintègre en une particule alpha et un noyau de tritium. La future machine DEMO devrait ainsi produire au fur et à mesure le tritium nécessaire à la réaction de fusion.

6. L'APPELLATION DE RÉACTEUR « PROPRE » EST-ELLE JUSTIFIÉE ?

La notion de « propreté », qui concerne ici la contamination radioactive, est subjective. Elle se juge par comparaison avec des activités similaires et avec des références nationales ou internationales. La réponse est alors : OUI. En effet, les réactifs dont le tritium (*élément radioactif*) sont utilisés en faibles quantités, surtout par comparaison avec les tonnes d'uranium des réacteurs à fission (*la fission, c'est-à-dire la perte de cohésion et l'éclatement des noyaux lourds tels que ceux d'uranium conduit aussi à un dégagement d'énergie considérable, mais elle génère des produits de fission radioactifs*). Les produits de la fusion, eux aussi en faibles quantités, sont des neutrons et des particules alpha.

L'effet des neutrons se retrouve essentiellement dans l'activation (formation de noyaux radioactifs) des matériaux qui constituent les parois de la chambre de réaction. Faisant partie intégrante des métaux et alliages des structures, la radioactivité induite s'accumulera pendant la vingtaine d'années de fonctionnement prévue, et sera à prendre en compte au moment du démantèlement de l'installation. Seule une partie des déchets sera récupérable, le reste donnerait de l'ordre de 37.000 tonnes de métaux et bétons radioactifs (56 % de très faible activité, 36 % de faible ou moyenne activité à vie courte et 8 % de faible ou moyenne activité à vie longue). Avec une densité moyenne de l'ordre de 6, la quantité de déchets radioactifs à vie longue représenterait un volume équivalent de 500 m³ à stocker sur une longue durée, soit un volume de 14 m x 7 m x 5 m de hauteur.

Il faut ajouter qu'une majorité des déchets radioactifs générés par ITER contiendront du tritium (période de demi-décroissance : 12,3 ans) et devront être entreposés dans un centre national dédié aux déchets tritiés (voir [fiche argumentaire GAENA N° 3](#)).

Les particules alpha ont un parcours très faible dans l'air (une feuille de papier à cigarette suffit à les arrêter) et n'auront donc que très peu d'impact sur l'activité moyenne dans l'installation.

C'est le tritium qui requiert le plus d'attention. La gestion du tritium se pratique déjà couramment dans les réacteurs à fission canadiens qui utilisent de l'eau lourde et produisent par activation des quantités notables de tritium, ainsi que dans les centres militaires français. Des règles précises ont été définies et adoptées par les instances internationales.

Les premières études de sûreté de l'installation, qui sont incluses dans le rapport préliminaire de sûreté, donnent des ordres de grandeur des doses qui seraient délivrées aux opérateurs, au public ou à l'environnement en fonctionnement normal ou accidentel. Celles-ci seraient largement en dessous des niveaux de la réglementation internationale. Par exemple, les doses dues aux divers rejets se calculeraient en microsievert alors que les limites légales sont de l'ordre du millisievert (soit mille fois plus). Rappelons au lecteur que le sievert est une

unité de dose qui traduit la dangerosité d'un milieu pour l'homme et que la dose naturelle reçue en France est en moyenne de 2,5 millisievert par an.

Après une phase initiale d'exploitation avec de l'hydrogène puis du deutérium, ITER fonctionnera avec un mélange deutérium – tritium. Pour le tritium, le transport et la comptabilité précise de l'inventaire seront faits dans le respect des règlements français et internationaux.

7. UN DES REPROCHES FAITS À L'ÉNERGIE DE FUSION EST LE DÉLAI LONG ET IMPRÉCIS QUANT AU PASSAGE AU RÉACTEUR INDUSTRIEL. QU'EN EST-IL AUJOURD'HUI ?

La construction de ITER a débuté en 2010, et le premier plasma n'est pas prévu avant 2030.

Suivront une vingtaine d'années pour la phase opérationnelle (expériences). (La durée effective prévue pour l'utilisation d'ITER est limitée à environ 3000 heures à pleine puissance, en raison des problèmes de résistance des matériaux au bombardement neutronique, point délicat du projet.)

Les premiers résultats ouvriront la voie vers le réacteur de démonstration à échelle 1, DEMO, et plus tard à un réacteur commercial. A la fin du programme ITER, il devrait être possible de mieux prévoir l'avenir de cette nouvelle filière. Dans ITER, les dimensions des principaux composants et le bâtiment qui les abrite sont proches de celles d'un réacteur de démonstration dont la puissance ne sera que trois à quatre fois plus grande.

La démarche envisagée en France est :

- construction de réacteurs EPR2 (voir [fiche argumentaire GAENA N° 70](#)) pour une mise en service à partir de 2035, afin de compléter le parc actuel et remplacer progressivement les réacteurs arrivant en fin de vie,
- études et finalisation de réacteurs de génération IV (voir [fiche argumentaire GAENA N° 22](#)), pour prendre progressivement le relais dans la deuxième moitié du XXI^{ème} siècle,
- enfin, prototype de réacteur à fusion, sans doute pas avant 2050, pour un développement industriel au XXII^{ème} siècle.

Il est à noter que, dans la décennie passée, le développement des techniques de fusion a été plus rapide que celui de l'électronique.

8. OÙ EN EST LE PROJET « ITER » ?

La mise en route d'ITER devrait avoir lieu au début des années 2030, en raison des retards de construction. Le budget, initialement estimé à 10 milliards d'euros sur 40 ans (50 % pour la construction et 50 % pour l'exploitation), a été réévalué en 2011 à 15 milliards pour la construction. Il dépasserait 20 milliards compte tenu des problèmes de soudures sur des pièces maîtresses fournies par la Corée. A noter qu'il ne sera pas possible de chiffrer le coût réel complet d'ITER, dans la mesure où 90 % des composants sont fournis en nature par les différents pays membres.

Ces chiffres sont élevés pour une installation expérimentale mais supportent la comparaison avec d'autres programmes comme celui de l'AirBus ou du porte-avions nucléaire. De plus, les retombées économiques, sociologiques et technologiques sont particulièrement importantes pour toute la région autour du site d'implantation. Une étude réalisée en France en 2002 prévoit qu'ITER créerait 3000 emplois indirects pendant les 10 ans de construction et 3250 emplois indirects (dont les 3/4 environ en région PACA) pendant les 20 ans d'exploitation.

ITER est un projet scientifique unique au monde par sa dimension internationale (34 pays rassemblés), son financement et son organisation. Celle-ci repose sur trois niveaux : l'organisation internationale, les agences domestiques, et en France l'agence ITER France chargée, entre autres, de l'accueil du personnel, de la viabilisation du site, et de l'organisation des convois exceptionnels.

L'organisation internationale (ITER Organization) est comparable à celle mise en œuvre pour la station spatiale internationale. Elle est régie par un traité international qui fixe les droits et obligations de chacun des 7 partenaires : Chine, Corée du Sud, Etats-Unis, Europe, Fédération de Russie, Inde, Japon.

L'organisation internationale est responsable de la conception de l'installation de recherche, de sa construction pendant 20 ans, de son exploitation pendant 20 ans et de sa mise à l'arrêt. Son directeur général rend compte de l'état d'avancement du projet à un conseil composé de représentants de chaque partenaire.

L'installation ITER, implantée à Cadarache, est une installation nucléaire de base (INB) régie par la législation française, du fait notamment de la quantité de tritium présente dans l'installation. La demande d'autorisation de création d'INB a reçu un avis favorable après enquête publique.

L'étude de la tenue des matériaux aux neutrons est développée au Japon, en association avec l'UE, les USA, et la Fédération de Russie, dans le projet IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility).

Le projet IFMIF est composé de 2 accélérateurs à deutons (ions deutérium) délivrant un faisceau de particules de deutérium de 40 MeV, et d'une source de lithium liquide, qui généreront le flux de neutrons le plus intense au monde (10^{17} neutrons/s). Le flux de neutrons viendra irradier des matériaux dans des cellules de test.

Cet immense défi qu'est la fusion nucléaire à confinement magnétique est un moteur incomparable pour nos industries de haute technologie et pour la communauté scientifique française, avec en première ligne le CEA.

9. COMMENT UTILISER TORE SUPRA COMME PRÉCURSEUR D'ITER ?

Compte tenu des défis auxquels ITER devra faire face, il a été décidé, au sein du programme international, de modifier Tore Supra pour étudier le comportement d'un divertor en tungstène. Le programme expérimental traite notamment les questions suivantes : conception des bords d'attaque, dégradation sous charge thermique et plasma, et permet la qualification des codes de transport sur le piégeage et la diffusion du tritium dans le tungstène et le comportement sous forte fluence. Le programme WEST (*Wolfram Environment in Steady-state Tokamak*) permet d'accroître l'expertise dans 3 domaines :

- la physique des plasmas, avec de longues décharges en mode H, contrôle de la contamination et extraction de puissance avec des parois en tungstène, ...
- la science des composants (refroidissement, tenue sous irradiation, vieillissement, ...)
- l'exploitation, et la surveillance des composants soumis au plasma,

et d'être fin prêt pour accompagner l'exploitation d'ITER.

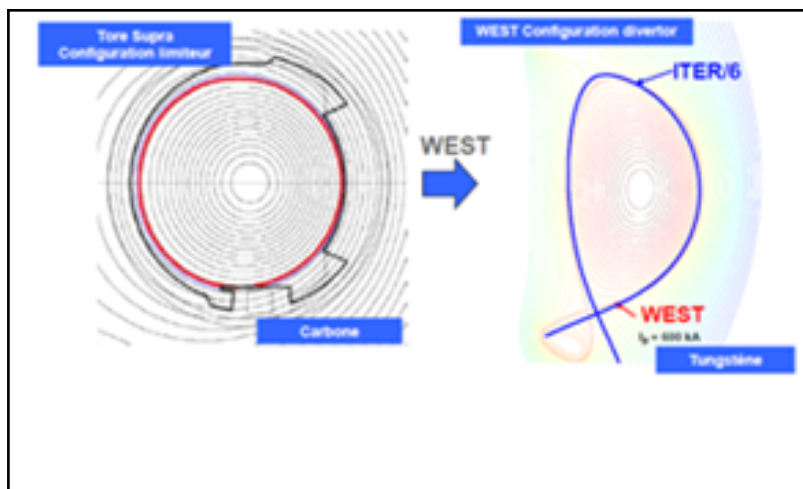


Figure 2 : Modification de Tore Supra, de configuration limiteur en carbone, en configuration divertor en tungstène

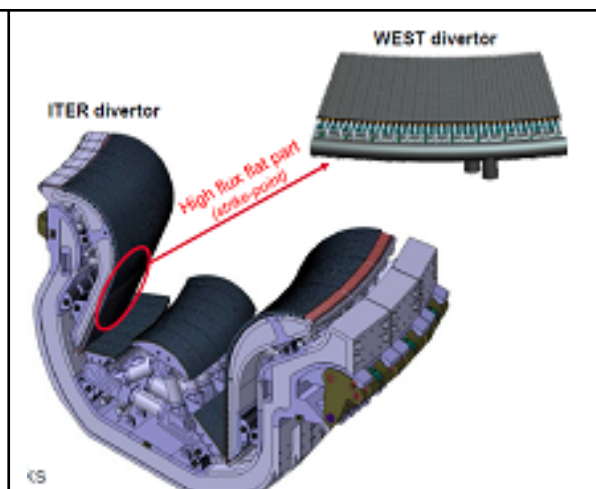


Figure 3 : Simulation du divertor d'ITER dans WEST

10. ITER SERA-T-IL DÉPASSÉ PAR DES STELLARATORS ?

Face à la taille et aux difficultés de construction d'ITER, d'autres technologies concurrentes sont testées, en particulier celle des stellarators, qui met en œuvre des aimants torsadés autour du tore, ce qui stabilise mieux le plasma et permet des tailles plus petites. Par contre, les tokamaks sont meilleurs pour maintenir des températures élevées.

Le site web de l'AIEA (IAEA.org) présente la répartition des sites d'étude des 77 tokamaks (en jaune) et des 17 stellarators (en rouge) dans le monde. En France, le projet de stellarator de la start-up Renaissance Fusion a été retenu fin 2023 en réponse à l'appel à projets « Réacteurs nucléaires innovants » de France 2030.

