

## UNE ETAPE DECISIVE DANS L'ETUDE DE LA FUSION : ITER

Les progrès des études de recherche et de développement dans le domaine de la fusion des noyaux des atomes se sont accélérés dans les années 80. Aujourd'hui, la communauté des chercheurs, forte des résultats obtenus aussi bien en physique nucléaire qu'en technologie, est prête à effectuer avec ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) un pas supplémentaire vers la réalisation d'un réacteur industriel thermogène. Ce prototype est en effet destiné à vérifier la « faisabilité scientifique et technique de la fusion nucléaire comme nouvelle source d'énergie ». Il ne produira donc pas d'électricité mais seulement de la chaleur.

### 1. EN QUOI CONSISTE ITER ?

ITER est une machine expérimentale exploitant la fusion nucléaire, phénomène dans lequel des noyaux légers comme ceux de certains isotopes de l'hydrogène (Tritium et Deutérium) sont amenés à fusionner 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 (*connues sous le nom de particules alpha*). C'est ce phénomène qui existe en permanence au sein des étoiles. ITER s'inscrit dans la filière énergétique de la fusion contrôlée magnétique qui tire son nom du mode de confinement du milieu réactionnel (*plasma*) par des champs magnétiques puissants.

Au moment où le monde prend de plus en plus conscience des problèmes énergétiques et même si les réacteurs à fusion ne figureront pas avant longtemps dans le panel des sources d'énergie, l'engouement est venu de la possibilité de disposer, dans le futur, grâce à une série de succès technologiques avec des machines du type tokamak (DIII-D, TFTR, JET, JT-60 et T-15), d'un réacteur thermogène d'une puissance sans précédent pour la quantité de réactif (*appelé usuellement combustible*) mise en jeu. C'est le cas de l'installation qui devrait être développée après ITER, appelée DEMO.

L'union européenne se voit confortée par son rang dans la recherche scientifique. Le site français étant retenu, un pôle d'excellence en matière de fusion sera développé dans le Sud-Est.

D'un point de vue international, ce projet est accueilli favorablement. Il concrétise une communauté d'intérêts entre les nations et, au même titre que les programmes de l'espace, il devrait collaborer à des relations pacifiques économiques importantes.

Cette filière est réputée pour sa grande sûreté, avec un niveau de radioactivité très faible et très peu de déchets radioactifs. Enfin, les sources de combustible sont abondantes.

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 1.

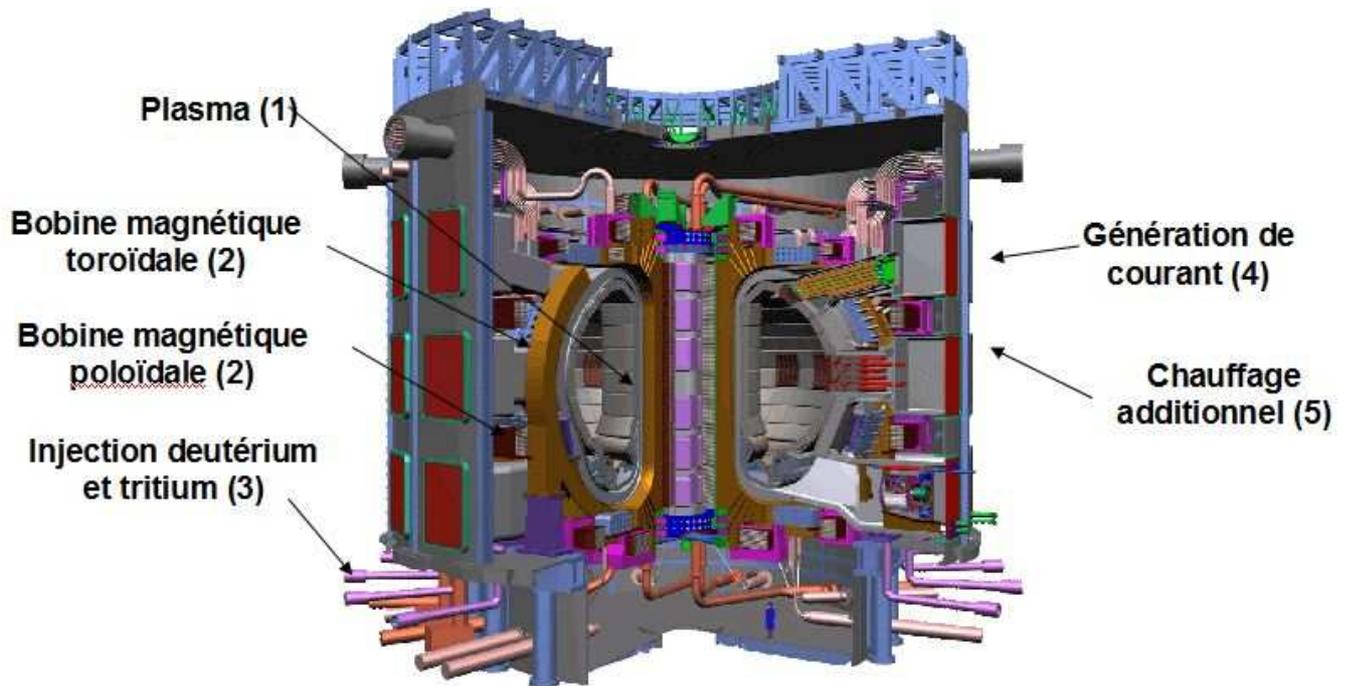
### 2. QUELS SONT LES OBJECTIFS D'ITER ?

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 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.

Dans ITER, les vitesses attendues pour les ions deutérium et tritium devraient être de l'ordre de quelques millions de mètres/seconde et, pour éviter des unités d'énergie peu familières, disons que les températures potentielles du plasma seraient de l'ordre de la centaine de millions de degrés.



La figure ci-dessus montre un éclaté d'ITER. La forme géométrique est simple : c'est un tore (*similaire à la chambre à air d'un pneu*). Le petit et le grand rayon du plasma confiné dans cette chambre (*de manière à ne pas toucher les parois*) sont respectivement voisins de 2 m et 6 m (1). Les particules ionisées s'enroulent suivant des lignes de champ en forme de spirale, sans toucher les parois.

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). Des systèmes additionnels (5) apportent l'énergie nécessaire pour entretenir les réactions de fusion. Les expériences déjà menées ont permis de vérifier une loi liant la densité du plasma, sa température et sa durée de maintien pour que l'énergie libérée par la fusion soit égale ou supérieure à l'énergie externe apportée. Une durée d'impulsion de 300 à 400 s devrait permettre de valider cette loi.

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

- Générer une puissance de 500 mégawatts en n'en consommant que 50, durant 400 secondes (6 minutes 40 secondes). Le record mondial est, à ce jour, de 16 mégawatts générés pour une puissance fournie de 25 MW, durant 1 seconde, réalisé par le Tokamak européen JET
- Maintenir les réactions de fusion dans le plasma pendant au moins 1000 secondes (16 minutes 40 secondes). Dans ce cas, pour 50 mégawatts fournis, seuls 250 mégawatts seraient produits. Le record mondial de durée est, à ce jour, de 6 minutes et 30 secondes, réalisé par le Tokamak français Tore-Supra en 2003.

### 3. COMMENT RECUPERER LA CHALEUR ?

Le programme 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. A ce jour, ces technologies ne sont pas encore complètement maîtrisées et des études seront menées en parallèle avec ITER dans des laboratoires indépendants. Ce sera un des objectifs de DEMO. Une méthode possible consisterait en une première barrière de lithium liquide avec pour but de protéger la seconde barrière, qui elle est solide.

### 4. QUELLES SONT LES SOURCES DE DEUTERIUM ET DE TRITIUM ? SONT-ELLES INEPUISABLES ?

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 ( $33 \text{ g/m}^3$ ), le tritium sera à terme produit à partir du lithium, abondant dans la croûte terrestre et dans les océans. Dans le réacteur DEMO, si le principe d'une paroi liquide en lithium s'avère efficace, il sera possible de régénérer du tritium par réaction avec ce lithium. En effet, lorsqu'il capture un neutron, le noyau de lithium se désintègre en une particule alpha et un noyau de tritium. 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.

## 5. L'APPELLATION DE REACTEUR « PROPRE » EST-ELLE JUSTIFIEE ?

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 intégrale des métaux et alliages, 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 30.000 tonnes de structures métalliques radioactives (60% de très faible activité, 30% de faible ou moyenne activité à vie courte et 10% 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  $500 \text{ m}^3$  à stocker sur une longue durée, soit un cube de moins de 10 m d'arête.

Les particules alpha ont un parcours très faible dans l'air (une feuille de papier à cigarette suffit à les arrêter) et donc n'auront que très peu d'impact sur l'activation 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 marquée au deutérium et produisent des quantités notables de tritium, ainsi que dans les centres militaires français. Des règles précises ont été définies et adoptées par les instances internationales. A Cadarache, l'installation Tore Supra d'étude de la fusion magnétique contrôlée a permis aux équipes de se confronter aux problèmes posés par un hydrogène radioactif qui se combine à l'oxygène pour donner une eau tritiée qui, comme l'eau simple, diffuse dans tous les milieux.

Les premières études de sûreté de l'installation qui seront 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  $\mu\text{Sievert}$  alors que les limites légales sont de l'ordre du  $\text{mSievert}$  (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  $\text{mSievert}$  par an.

Après une phase initiale d'exploitation avec de l'hydrogène puis du deutérium, ITER fonctionnera 10 ans 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.

Par ailleurs, en dehors du tritium, il faut noter qu'un réacteur à fusion n'utilise ni ne produit de matières fissiles susceptibles d'être détournées à des fins de prolifération.

## 6. UN DES REPROCHES FAITS A L'ENERGIE DE FUSION EST LE DELAI LONG ET IMPRECIS QUANT AU PASSAGE AU REACTEUR INDUSTRIEL. QU'EN EST-IL AUJOURD'HUI ?

La durée du programme ITER peut être estimée à une dizaine d'années pour l'approvisionnement et la construction, puis à une vingtaine d'années pour la phase opérationnelle (expériences). 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.

Face à la crise énergétique et à un besoin de plus en plus pressant (au cours des journées d'hiver froid de 2005, la surconsommation d'électricité a été de l'ordre de 1200 MWe soit l'équivalent de celle d'un réacteur REP), la démarche souhaitable serait :

- dans l'immédiat, finalisation et construction de réacteurs EPR (European Pressurized Reactor) pour remplacer de manière encore plus sûre et plus efficace les réacteurs actuels arrivant en fin de vie,
- puis, choix, études et finalisation d'un réacteur de génération IV pour un démarrage de construction prenant le relais,
- enfin, prototype et réacteur à fusion, sans doute pas avant 2050.

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

## 7. OU EN EST LE PROJET « ITER » EN 2009 ?

ITER devrait, selon ses concepteurs, être achevé en 2018, avec deux ans de retard sur l'agenda prévu. Le budget, initialement estimé à 10 milliards d'euros sur 40 ans (50% pour la construction et 50% pour l'exploitation), risque de subir une augmentation de 3 milliards. Ces chiffres sont élevés pour une installation expérimentale mais supportent la comparaison avec d'autres programmes comme ceux de l'AirBus, du porte-avions nucléaire, voire d'un EPR. Voici un marché intéressant avec des retombées économiques, sociologiques et technologiques 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.

Actuellement, les pays membres du projet sont : La Russie, la Chine, la Corée du sud, les Etats-Unis, le Japon, l'union Européenne, et, à hauteur de 10 %, Le Brésil et le Kazakhstan ont déposé une candidature.

La gestion d'ITER est réalisée par un ensemble d'instances où se réunissent les différents membres :

- La principale instance est le Conseil ITER, Il est composé de huit membres : deux Européens, deux Russes, deux Japonais et deux Américains.
- Le Conseil ITER est assisté d'un comité technique et d'un comité de gestion.

La phase de construction a commencé début 2007 par le défrichage du site et devrait durer de 8 à 10 ans. Actuellement, les travaux de viabilisation et d'aménagement du terrain sont en cours.

La phase d'exploitation devrait commencer en 2018 (premier plasma) et durer 21 ans

La durée effective d'utilisation d'ITER prévue est de 300 heures, réparties en de multiples expériences et tests de quelques minutes, et ce, pour des problèmes de matériaux. A comparer avec les 7000 ou 8000 heures par an d'utilisation d'une installation industrielle pendant 40 à 60 ans.

Une fois la phase d'exploitation terminée, il faudra démanteler l'installation.

Les premières discussions entre futurs partenaires du projet ont assez rapidement limité le choix du site d'implantation entre d'une part Rokkasho-Mura au Japon, candidature soutenue par le Japon, les Etats-Unis et la Corée du Sud, et d'autre part Cadarache, en France soutenue par l'Europe, la Russie et la Chine. La communauté européenne a décidé à l'unanimité du choix de Cadarache. Fin juin 2005, un accord a été obtenu avec le Japon pour retenir le site de Cadarache.

Le Japon s'est désisté après avoir obtenu de participer à hauteur de 20% du personnel d'exploitation de la machine et la mise en place de centres d'études des matériaux constituant la paroi de la chambre à plasma. L'étude de la résistance des matériaux aux neutrons étant un point délicat du projet, la qualification des matériaux dans IFMIF (International fusion Materials Irradiation Facility) au Japon est essentielle

Le centre de Cadarache possède des atouts majeurs avec, par exemple, des équipes scientifiques de grande valeur, ayant acquis une précieuse expérience sur des machines « Tokamak » plus petites.

Cet immense défi à relever ne peut être qu'un moteur incomparable pour nos industries de haute technologie et pour la communauté scientifique française, avec en première ligne le CEA.

-----