

# La fusion thermonucléaire contrôlée: une promesse d'énergie inépuisable \*

## Iter : un défi mondial

Pierre J. Paris

Une centaine de kilos d'un combustible inépuisable permettra, dès la seconde moitié du 21e siècle, de produire autant d'énergie qu'un million de tonnes de pétrole. Tel est le potentiel de la fusion thermonucléaire, une fois qu'elle sera domestiquée par l'homme.

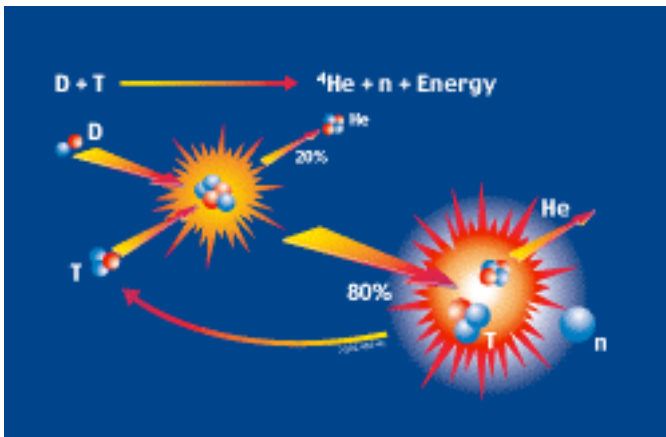
Dans le Soleil et les autres étoiles, les noyaux légers fusionnent en libérant de formidables quantités d'énergie. Ces réactions sont à l'origine de la chaleur et de la lumière diffusées dans l'espace. Pour fusionner, les noyaux doivent surmonter leur tendance naturelle à se repousser. Cet obstacle peut être levé lorsque la matière est portée à une température très élevée, soit plusieurs dizaines de millions de degrés. Au cœur du Soleil, les noyaux d'hydrogène (protons) fusionnent à environ 15 millions de degrés et à des pressions considérables. Ce sont les mécanismes d'effondrement gravitationnel qui fournissent la chaleur requise. Le confinement est réalisé par l'équilibre entre la pression de radiation produite et le champ de gravitation.

Le Soleil est le réacteur le plus stable que l'on puisse concevoir. Il rayonne depuis plusieurs milliards d'années et il est loin d'avoir épuisé son combustible primaire, l'hydrogène. C'est la fusion en hélium de 500 millions de tonnes d'hydrogène par seconde qui entretient ce gigantesque flux de puissance dans les étoiles, soit l'équivalent d'un Cervin par minute ! La masse perdue du Soleil est de 4 millions de tonnes par seconde, c'est cette masse qui est convertie en énergie, l'autre, beaucoup plus conséquente est convertie en hélium. Il est convenu d'apprécier que 90% de la masse est encore constituée d'hydrogène...Et quand on sait qu'un gramme d'hydrogène engendre 180'000kWh de rayonnement...On peut penser que sur terre si l'on arrive à domestiquer l'énergie de fusion, on aura à disposition de l'énergie (et surtout de la puissance) pour des millions d'années !

### Des combustibles en grande quantité

Sur terre, ce sont le deutérium et le tritium qui serviront de combustible à la fusion exploitée à des fins énergétiques. L'énergie libérée par la réaction de ces deux isotopes de l'hydrogène est de l'ordre de 100000 kilowattheures pour 1 gramme de combustible, soit dix millions de fois supérieure à celle du pétrole. Le deutérium est omniprésent dans la nature. Chaque mètre cube d'eau en contient 33 grammes.

Le tritium est une forme radioactive de l'hydrogène qui doit être produit à partir du lithium, un métal léger omniprésent dans la nature. Un réacteur de 1000 mégawatts électriques consommera 88 kilos de deutérium et 132 kilos de tritium. Pour obtenir la même quantité d'énergie, il faudrait brûler 2 millions de tonnes de pétrole ou 3,6 millions de tonnes de charbon.



Réaction de fusion du deutérium et du tritium  
*1 g. de deutérium et 1,5g. de tritium qui fusionnent libèrent environ 100'000kWh*

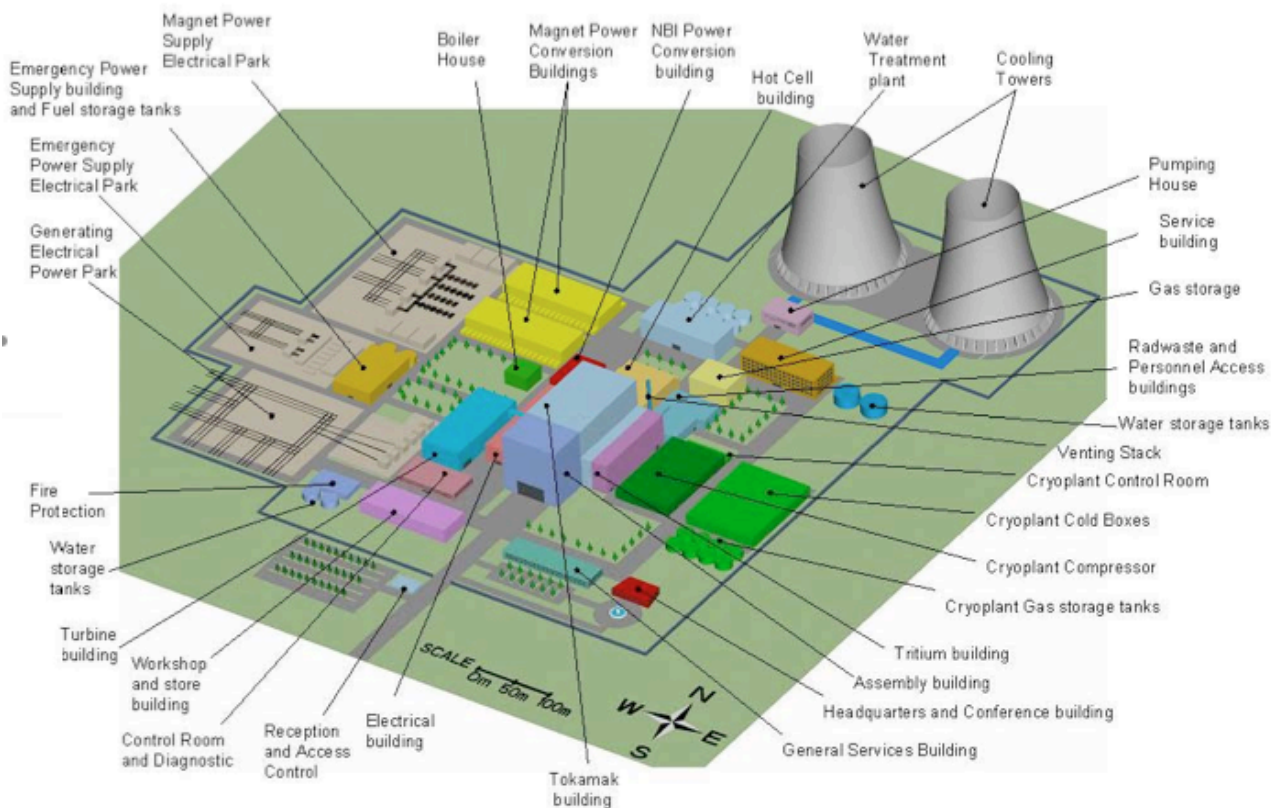
### Réacteur stable

Il est impossible de reproduire sur Terre les mécanismes mis en œuvre dans le Soleil du fait, notamment, de la force gravitationnelle de cette étoile, dont la masse est 330 000 fois supérieure à celle de notre planète. Pour obtenir de l'énergie utile, deux voies sont explorées:

- porter à très haute pression et à haute température un petit volume de matière pendant un temps extrêmement court. On parle alors de confinement inertiel. La filière inertielle, utilise des faisceaux de lumière laser ou des faisceaux particulaires (ions, électrons) pour apporter l'énergie de chauffage et de compression de petites cibles contenant les combustibles sous forme solide (glace). Il s'agit d'obtenir le plus grand nombre possible de réactions de fusion avant que le plasma ne se disperse en augmentant de volume. On se rapproche ainsi des densités et pressions comparables à celles existant au cœur du Soleil, mais pour un temps très court, de l'ordre du millionième de seconde. Dans la plupart des cas, cette recherche a été tenue secrète à cause de ses implications militaires. Le programme civil de fusion européen ne consacre à cette filière qu'une petite activité de veille technologique;
- «piéger» et maintenir à très haute température un plasma formé de particules électriquement chargées. C'est le confinement magnétique, dans lequel un plasma tenu de basse densité réagit pendant un temps supérieur à la seconde, et sur lequel s'est concentré l'essentiel des recherches internationales. Historiquement, les premiers travaux de recherche civile internationale ont porté sur le développement des tokamaks, des réacteurs avec chambre à vide toroïdale et bobine magnétique. Et depuis 1968, les meilleures performances ont été obtenues avec ce genre de dispositif. Le plus grand modèle, le Joint European Torus (JET), en fonction depuis 1983, a obtenu une série de records mondiaux, dont la première fusion contrôlée deutérium-tritium en 1991.

### ITER, le chaînon manquant

ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) est une installation expérimentale dont les partenaires sont: la Communauté Européenne (plus la Suisse), la Fédération de Russie, l'Inde, le Japon, les Etats-Unis, la Chine et la Corée du Sud. Le Brésil et l'Australie ont déclaré leur intérêt à ce projet et émis le désir d'entrer dans le partenariat. Il a été décidé de construire ITER en Europe, sur le site de Cadarache en France. La figure ci-dessous présente l'implantation du site d'Iter à Cadarache.



Iter est un tokamak, donc une installation qui requiert le champ magnétique pour contenir et maintenir le plasma dans une configuration torique. Ce sera une installation expérimentale dont les aimants seront entièrement supraconducteurs refroidis à l'hélium liquide. Le champ magnétique torique sera de l'ordre de

5,3 teslas (environ 100'000 fois le champ magnétique terrestre). Pour cela, la machine sera intégrée dans un énorme cryostat et se présentera selon le schéma suivant.

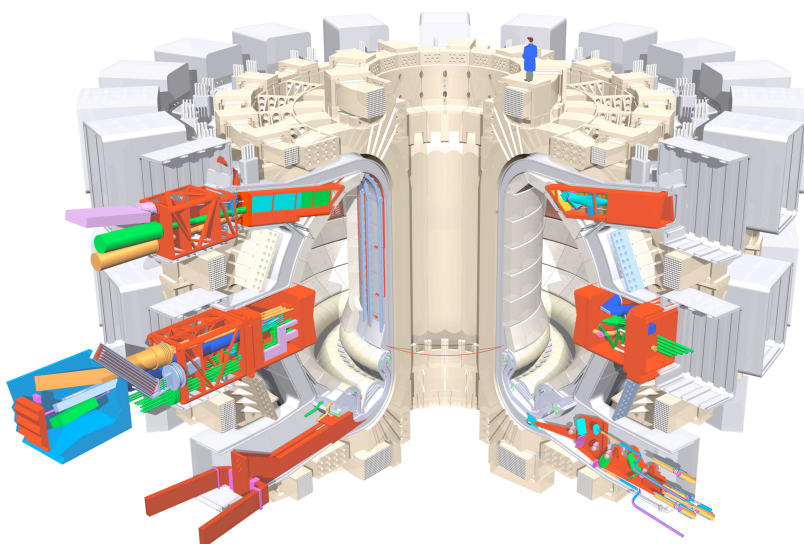
La construction de l'installation sera réalisée par lots attribués aux divers partenaires internationaux. Entre ITER et les pays contribuant au projet, il a été instauré des agences « domestiques » qui seront responsables de la sous-traitance des composants dans leur pays ou entité. Les composants seront acheminés vers le site de Cadarache, notamment par bateaux et par route. Ceci a pour conséquence la mise en œuvre de travaux de génie civil afin d'adapter les voies d'accès aux convois spéciaux.

Par ailleurs l'ITER étant un projet mondial, les équipes internationales qui seront amenées à travailler sur le site et qui viendront avec leur famille auront à disposition une école internationale permettant d'accueillir les enfants de tous les pays partenaires du projet.

### Les promesses d'ITER

Sa taille imposante (12,4 mètres de diamètre) répond à une règle simple: plus la machine est importante, plus elle est efficace. Un plasma volumineux peut abriter de très nombreuses réactions de fusion et dégager plus d'énergie. Celui d'ITER atteindra un volume de 840 m<sup>3</sup>, soit un volume environ de 8 fois celui de JET. En construisant ITER, machine mondiale, on devrait réussir à atteindre les conditions d'ignition et un facteur d'amplification de l'énergie de l'ordre de 5 à 10. Par ailleurs ITER devrait montrer que les technologies nécessaires à un réacteur sont disponibles (p.ex. supraconducteur, télémanipulation). Certains composants internes permettront également de réaliser des expérimentations de production de tritium à l'intérieur de la machine, indispensables pour valider cette technologie dans la perspective d'un réacteur industriel. Avec le flux neutronique, des tests de composants structurels d'un réacteur pourront être entrepris en parallèle avec une nouvelle installation technologique pour les essais en matériaux adaptés à la fusion (IFMIF). Egalement des tests conceptuels qui seront nécessaires pour assurer dans un réacteur la génération du Tritium, l'extraction de la chaleur et la génération d'électricité.

La figure ci-après montre un éclaté du tokamak l'ITER, le personnage laisse entrevoir la grandeur des éléments.



Les premières années seront consacrées à l'étude du plasma d'hydrogène et du deutérium. Ensuite, ITER visera à répondre à deux objectifs scientifiques essentiels sur la base d'un mélange deutérium-tritium:

- permettre d'obtenir les conditions d'ignition avec un facteur d'amplification de l'énergie de l'ordre de 5 à 10, seuils nécessaires pour valider cette technologie dans la perspective d'un réacteur industriel, et ainsi générer une puissance de base de 400

à 700 MW tout en n'en injectant que 50 à 70 durant plus de 6 minutes.

- démontrer que les réactions de fusion dans le plasma peuvent être maintenues en quasi-continu pendant près de 10 minutes..
- Permettre des tests de composants structurels d'un réacteur qui pourront être réalisés en parallèle avec une nouvelle installation technologique pour les essais en matériaux adaptés à la fusion (IFMIF).

La génération de machines suivant ITER sera celle du réacteur de démonstration («DEMO-PROTO») qui, pour la première fois, serait capable de produire des quantités importantes d'électricité et de s'autoalimenter en tritium. Ceci ouvrira alors la voie à la construction commerciale des centrales électriques à fusion.

Le programme stratégique ITER, PROTO-DEMO devient plus acceptable et volontaire dans la quête urgente de la validité de la fusion à terme de 35 ans. Il ne faut pas perdre de vue qu'il faut remplacer les fossiles en 40-75 ans. Mais pour arriver à ce qu'il y ait une participation notoire de la fusion dans la panoplie énergétique mondiale, il faudra sans doute attendre la fin du siècle. A titre de comparaison, il a fallu plus de cinquante ans pour que la fission joue un rôle important dans la production d'électricité (actuellement environ 450 centrales installées dans le monde, soit environ 8% de l'électricité produite).

### La première pierre



<< Le 17 novembre 2010, sur la plateforme, le Professeur Osamu Motojima, directeur général d'Iter et M. Igor Borovkov, Chef de la délégation russe au Conseil d'Iter ont dévoilé la première pierre du futur Bâtiment Siège d' « ITER Organization » (un rocher de 2,5 tonnes, extrait de la fosse du tokamak).

La communauté mondiale des chercheurs en fusion est convaincue que l'on peut reproduire, ici sur Terre, les réactions physiques qui donnent vie au Soleil et aux étoiles ; elle attendait ce moment depuis plus longtemps encore. "Dès le milieu des années soixante-dix, nous

avons commencé à élaborer ce qui est aujourd'hui ITER", devait rappeler Evgueny Velikhov, président du Conseil d'ITER, l'une des personnalités les plus emblématiques de cette communauté, qui fut longtemps le conseiller scientifique de Mikhaïl Gorbatchev et préside aujourd'hui le Conseil ITER.



<< Vingt-cinq ans plus tôt, le 19 novembre 1985, à Genève, Ronald Reagan et Mikhaïl Gorbatchev s'engageaient à développer "pour le bénéfice de l'humanité tout entière" un ambitieux programme de recherche sur l'énergie de fusion : la construction du "projet ITER".

Evgueny Velikhov : "Nous savions que seul un vaste programme international pourrait nous permettre de démontrer la faisabilité scientifique et technique de

l'énergie de fusion. En 1985, Gorbatchev, qui avait longuement discuté de ce projet avec le président Mitterrand lors de sa première visite en France, un mois avant la rencontre au sommet de Genève, l'a proposé à Reagan. Et c'est ainsi que tout a vraiment commencé."

"Le rêve que nous avons si longtemps nourri s'est mué en une réalité tangible, devrait déclarer le Pr. Osamu Motojima, directeur général d' ITER Organization. Nous allons faire naître un petit Soleil à Cadarache."

### Les impacts économiques d'ITER

Les retombées de l'implantation du projet ITER à Cadarache sont multiples: social et culturel, économique et scientifique. ITER emploiera directement 500 à 800 personnes en moyenne durant la phase de construction (2009 à 2019) et 1000 à 2000 personnes en moyenne durant l'exploitation (2020 à 2035). Le budget\* global a été estimé en 2010 à environ 13.5 milliards d'euros sur 25 - 30 ans, sans doute à revoir à la hausse ultérieurement - provisions pour la désactivation et le démantèlement comprises-. Ce coût avait



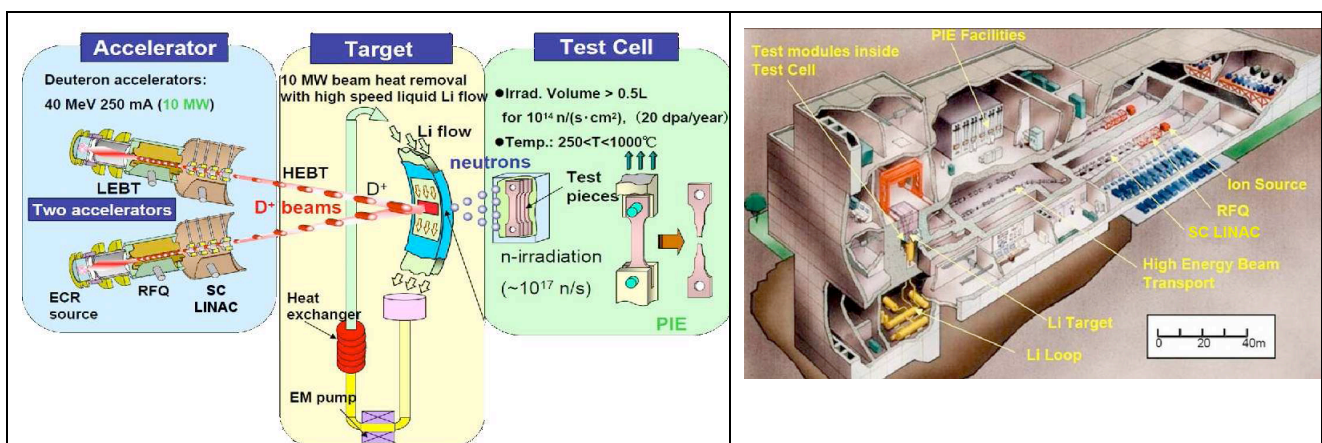
été revu à la hausse, il peut paraître pharaonique et a même fait l'objet d'intenses critiques, mais il s'agit là de la « big science » qui peut prétendre apporter une solution à la problématique de l'énergie pour les siècles à venir...Et ce n'est finalement pas si élevé si on en mesure l'enjeu final. Il faudrait par ailleurs comparer ce projet au LHC (large Hadron Collider) du CERN (coût final évalué à 6.5 milliards CHF lors de sa mise en route en 2008, le tunnel circulaire ayant été construit initialement pour le collisionneur précédent, le LEP) et à la Station Spatiale Internationale ISS (aujourd'hui évaluée à environ 100 milliards €). Ces grands projets internationaux qui réunissent une grande partie de la planète dans sa quête du savoir et l'amélioration des techniques et des technologies, projettent la société dans le futur.

Iter est un projet fédérateur, au niveau mondial – les pays contribuant représente plus de 50% de la population mondiale -, c'est aussi en cela un grand pas dans quête de la paix et dans la recherche commune de solutions viables, encadrées et intégrées dans cet impératif de réponse à la demande énergétique planétaire qui ne peut que croître.

Même si la plus grande partie des composants de l'installation seront construits ailleurs, les retombées économiques d'un tel projet auront un impact bénéfique sur la région Provence-Alpes-Côte-d'Azur. De plus le développement technologique pourrait favoriser l'implantation dans une large région de laboratoires de recherches et d'entreprises innovantes comme cela s'est déjà produit lors de l'implantation du CERN à Genève.

La recherche en fusion est une locomotive technologique qui favorisera l'émergence d'autres technologies, informatique et robotique par exemple. Elle agit comme un moteur pour l'industrie permettant de faire progresser les connaissances des uns et des autres. Les composants de haute technologie développés dans le cadre des recherches pour la fusion trouvent des applications dans les domaines de l'électronique de puissance ou de l'aérospatiale, mais encore dans la médecine et l'astronomie et bien sûr dans le domaine des instruments de mesure du plasma qui trouvent également des applications industrielles. Le développement de matériaux à basse activation soumis à des doses de neutrons équivalentes à celles reçues par les éléments d'un réacteur au terme de leur vie, non seulement permettra à la fusion d'être acceptée comme source d'énergie, mais trouvera aussi des applications industrielles et énergétiques.

## IFMIF



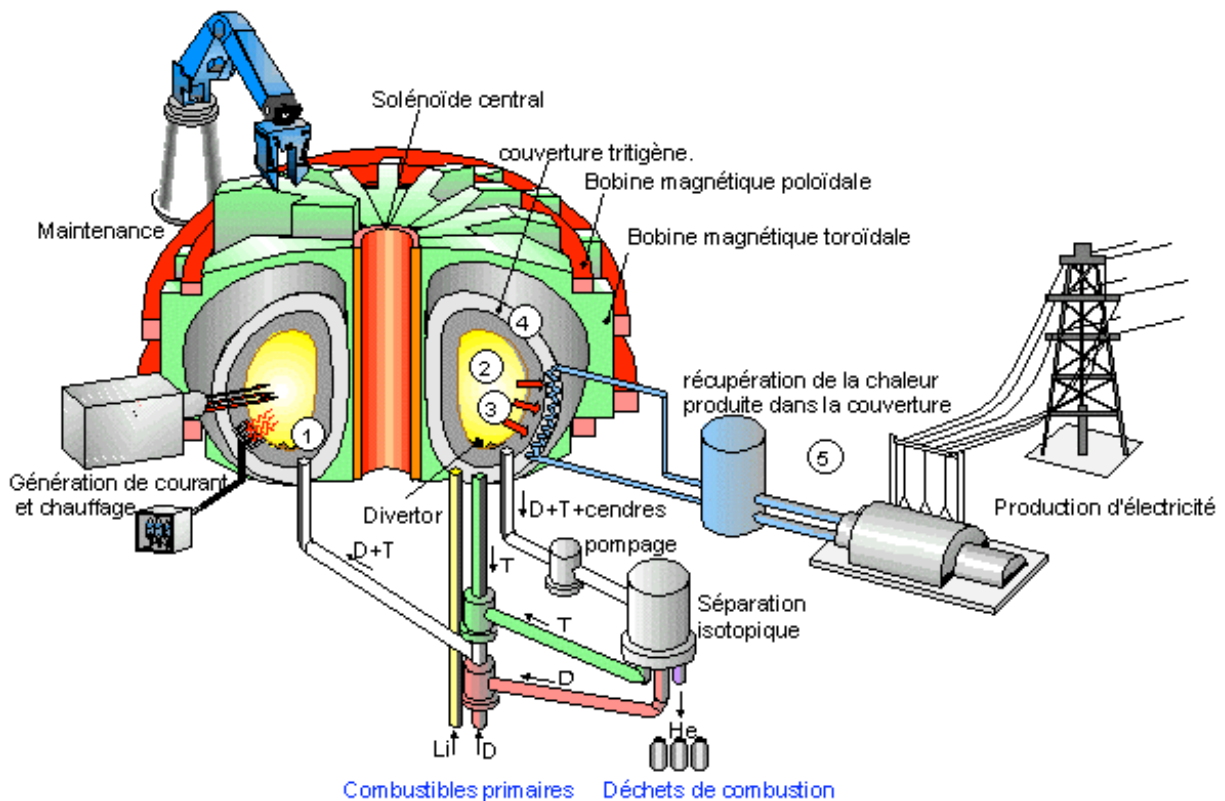
L'attractivité de la fusion est certaine, encore faudra-t-il s'affranchir des « déchets » qui devraient pouvoir être recyclés et entreposés sur le site de la centrale même.

Les partenaires du projet ITER sont sur le point de prendre une décision importante concernant la construction d'une autre grande installation spécialement conçue pour étudier les matériaux structurels d'un cœur de centrale à fusion. La nécessité d'une source de neutrons à 14 MeV pouvant être exploitée en parallèle avec ITER est impérative, d'où le projet mondial IFMIF (International Fusion Material Irradiation Facility).

A titre de compensation, l'Europe recevant ITER, le Japon pourrait être le pays d'accueil pour ce nouveau projet mondial. Parmi les objectifs principaux d'IFMIF :

- études consacrées à la couverture tritigène avec refroidissement à l'hélium, ces recherches sont capitales pour le développement du cycle du tritium d'un réacteur à fusion.
- développement des matériaux de structure pour les futurs réacteurs axé sur les aciers ferritiques et martensitiques à faible activation (type EUROFER) et sur les matériaux composites de carbure de silicium.
- études consacrées à la sécurité et à l'environnement sont bien sûr étudiées attentivement.
- amélioration des concepts et la réduction des quantités de matériaux activés – notamment à long terme-. Ceci permettrait de réduire les inventaires des déchets radioactifs, et ainsi d'assurer une sécurité accrue.

### La centrale à fusion



Contrairement à une centrale à fission, qui fonctionne comme une pile, une centrale à fusion est une chaudière dans laquelle le mélange combustible D-T est injecté et ionisé. Le plasma «brûle», aussi le réacteur produit des cendres (les atomes d'hélium) et de l'énergie sous forme de particules rapides ou de rayonnement. L'énergie produite sous forme de particules chargées est absorbée par le plasma – l'hélium est confiné -. L'énergie issue du rayonnement est absorbée dans la «première paroi», l'enceinte contenant le plasma. L'énergie qui apparaît sous forme d'énergie cinétique des neutrons est, quant à elle, convertie en chaleur dans la couverture (ou manteau): élément au delà de la première paroi, mais néanmoins à l'intérieur de la chambre à vide. La chambre à vide elle-même est le composant qui clôt l'espace où ont lieu les réactions de fusion. Première paroi, couverture et chambre à vide sont refroidies par un système d'extraction de la chaleur qui est utilisée pour produire de la vapeur et alimenter un ensemble classique turbine et alternateur producteur d'électricité.

Le neutron, qui quitte le plasma et est absorbé dans la couverture, ne fait pas qu'abandonner son énergie qui est évacuée en direction des générateurs de vapeur par un fluide caloporteur, il provoque aussi une réaction sur le lithium présent pour produire du tritium. Effectivement, comme nous l'avons vu la production du tritium se fait par une réaction des neutrons sur le lithium naturel, contenant deux isotopes

le  ${}^6\text{Li}$  et le  ${}^7\text{Li}$ . On a intérêt à privilégier la réaction sur  ${}^6\text{Li}$ , qui est exothermique, et donc à utiliser du lithium enrichi en  ${}^6\text{Li}$ . Cette opération d'enrichissement est simple et déjà pratiquée industriellement.

A l'arrière de cette couverture tritigène existe un système qui assure à la fois, la fourniture de lithium, l'extraction de la chaleur et l'extraction du tritium.

Une autre fonction de la couverture est celle de protection neutronique. En réduisant considérablement et l'énergie des neutrons et le flux neutronique la couverture protège les composants postérieurs, notamment les aimants supraconducteurs. Cette protection est complétée autour du tore par une protection biologique assurée par une paroi en béton.

### **Durabilité**

La fusion est une source d'énergie potentielle illimitée, qui remplit de surcroît les critères du développement durable, avec les caractéristiques suivantes:

- il n'y a pas de réactions en chaîne, les neutrons ne participent pas à la réaction
- les combustibles de base (deutérium et lithium) sont non radioactifs, abondants et distribués uniformément dans les océans et la croûte terrestre;
- le principe même de la fusion exclut tout emballage du réacteur;
- la faible quantité de combustible a pour effet de provoquer l'arrêt immédiat de la réaction à la moindre perturbation;
- la fusion ne produit que de faibles quantités de déchets radioactifs à vie courte, dont le stockage pourrait être limité à une ou deux générations seulement;
- elle n'entraîne pas de pollution atmosphérique ou effet de serre.

La fusion pourrait s'avérer comme étant une source productrice d'électricité et de chaleur à distance d'une grande fiabilité et d'une sécurité sans faille, et grâce au coût faible des combustibles, d'un excellent rendement économique malgré un coût élevé des centrales. L'électricité est le vecteur énergétique le plus adapté à la société moderne, son utilisation devient universel.

### **Conclusion**

Avec l'accès au breakeven, les progrès récents réalisés dans la recherche en fusion thermonucléaire laissent entrevoir que le calendrier prévu par les scientifiques pour la démonstration de la faisabilité scientifique sera tenu. Il faudra cependant attendre la réalisation d'ITER pour atteindre l'ignition et la confirmation que la voie choisie, celle du tokamak, est bien la bonne. Les recherches technologiques, menées en parallèle, apporteront plus précisément l'approbation finale de la fusion comme étant une option énergétique compatible au développement durable, accessible et acceptée par la population.

La recherche en fusion devrait favoriser l'émergence d'autres technologies, informatiques et robotiques par exemple, mais aussi dans l'électronique de puissance, l'aérospatiale, la médecine, l'astronomie et d'autres applications industrielles du plasma. Mais c'est évidemment dans le domaine de l'énergie que cet effort devrait porter les fruits les plus prometteurs.

*Notes :*

*\* Le coût global d'ITER était jusqu'alors basé sur des estimations datant de 2001 : env. 10 Mia€. Depuis lors, de multiples facteurs ont largement fait évoluer celui-ci:*

- *L'inflation*
- *L'augmentation du coût des matières premières (+ 200 à 300% pour l'acier)*
- *L'augmentation du coût de la construction*
- *L'adaptation d'un «design générique» au site de Cadarache*
- *Les améliorations issues du retour d'expérience des autres installations*
- *Le passage de trois à sept membres, qui nécessite de nouvelles interfaces, ....*

*A la base la clé de répartition du budget était de la sorte : 45% pour l'Europe & la France (80% de ceci pour*

*l'Europe & 20% pour la France), les 55% restant répartis entre les autres partenaires (9%, chacun). Seule l'Europe avait alors officiellement actualisé le coût de sa contribution à l'ensemble du programme ITER, passant de 3.5 à 6.6 Milliards d'Euros.*

*Par ailleurs 90% de la contribution des pays membres se faisant en «nature»(c'est à dire par livraison directe des composants issus des pays partenaires, et à leurs coûts de réalisations), l'évolution des coûts sera différente, car adaptée pour chaque pays, ce qui peut rendre le coût total quelque peu différent – et plutôt inférieur - à celui annoncé dans le texte.*

*\*\*La polémique concernant le coût d'ITER est réapparue après cette annonce d'augmentation faite au cours de l'été 2010. Notamment une poignée de scientifiques avait pris position sur le fait que le projet avait un coût trop élevé et qu'il serait mieux de s'atteler à produire des centrales nucléaires à fission du type Génération IV (GEN IV). Pour eux, nous sommes très proche de cet objectif et aurions ainsi du temps -- environ 5000 ans de réserve de combustibles pour GEN IV—à disposition pour trouver des solutions au problème énergétique.*

*Ceci étant, la neutronique de ces réacteurs fait que les matériaux repose sur une sélection semblables à ceux qui seront utilisés pour la première paroi d'un réacteur à fusion...*

Pierre J. Paris,  
Septembre 2011

*\*Tiré de l'article « La fusion thermonucléaire : 100MWh à partir d'un gramme de combustible », bulletin SEV/VSE, 9/2006.*