



Énergie nucléaire

ITER vers une future source d'énergie?

Les décisions sont arrêtées. Le chantier est lancé. Le réacteur thermonucléaire ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), implanté à Cadarache, entrera en service en 2015-2016, même si certains physiciens ont contesté l'opportunité de cette entreprise.

ITER (en latin la voie) est une étape sur le chemin de l'autre source d'énergie nucléaire : des réactions de **fusion** de noyaux légers qui comme les réactions de **fission**, fragmentation de noyaux lourds, sont exothermiques. Mais alors que la fission, maîtrisée dans des réacteurs depuis 1942, est passée au stade industriel vers 1970, la fusion en est encore au stade expérimental. Ce long délai est dû à des causes spécifiques : masse de nouvelles connaissances qu'il fallait acquérir, nombreuses techniques d'avant garde à développer, nécessité d'expérimenter sur des installations de grande taille, extrêmement coûteuses.

Fusion thermonucléaire

Par application de la formule $E = mc^2$, la fusion de 4 noyaux d'hydrogène pour former un noyau d'hélium, plus léger que la somme de 4 protons, est depuis 1919 (**Jean-Baptiste Perrin**) reconnue comme la source d'énergie du Soleil et des autres étoiles. La réaction proton-proton est une interaction faible dont la probabilité, excessivement petite, garantit la longue vie du Soleil en même temps qu'elle exclut toute mise en œuvre sur la Terre.

En revanche, les réactions du deutérium, découvertes en 1934 par Rutherford et ses collaborateurs, ont des probabilités (sections efficaces) qui les rendent compatibles avec une source d'énergie terrestre à la condition d'être produites en **régime thermonucléaire** : au sein d'un gaz chaud complètement ionisé (plasma), projectiles et cibles ont une distribution en énergie dont une seule tranche, vraiment active, correspond au maximum de probabilité de la réaction. Située à une énergie très supérieure à la moyenne (température du plasma), elle est constamment renouvelée. Les étoiles et toutes les machines à fusion construites à ce jour fonctionnent sous ce régime. Les températures sont nécessairement élevées : au moins 10^7 K ou en unités d'énergie 1 keV.



Né à Lille, le 30 septembre 1870, **Jean-Baptiste Perrin** fit ses études à l'École Normale Supérieure en 1891 où il resta attaché comme agrégé préparateur.

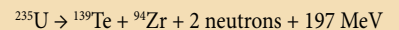
Chargé de créer l'enseignement de la Chimie-Physique à la Sorbonne, Jean Perrin y professa jusqu'en 1940. Il chercha à étayer par des preuves expérimentales certaines l'hypothèse atomique, encore très contestée à l'époque. Il fit, en 1908, la première détermination incontestable du nombre d'Avogadro qui fixe les grandeurs moléculaires.

Ses expériences mémorables, et notamment la vérification de la théorie d'Einstein sur le mouvement brownien, pour lequel lui fut décerné, en 1926, le prix Nobel de Physique, furent exposées en 1913 dans un livre : « Les Atomes ». Jean Perrin s'est beaucoup investi dans la vulgarisation de la science avec, entre autres, la fondation du Palais de la Découverte.

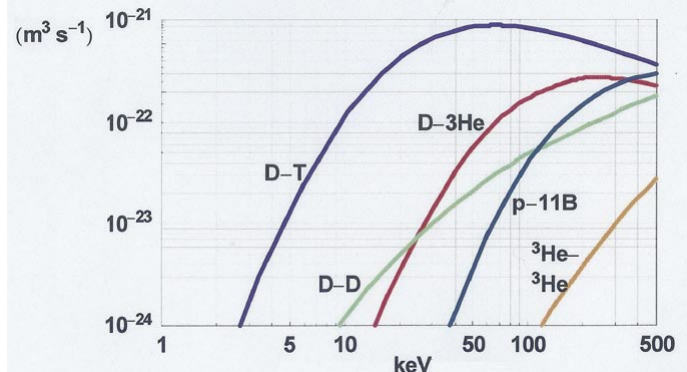
L'astronomie passionnait Jean Perrin qui fut le premier à trouver l'origine du flux d'énergie rayonnée par le soleil en montrant dès 1920 que seule la fusion d'hydrogène en hélium peut en rendre compte.

Fission-Fusion

La fission d'un gros noyau en deux noyaux plus petits produit de l'énergie. C'est la différence de masse des différents constituants qui permet de dégager environ 200 MeV dans la réaction de fission de ^{235}U .



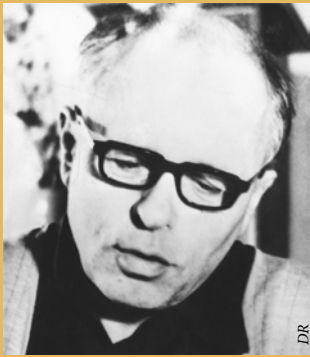
Dans le cas de noyaux légers, il faut au contraire fournir de l'énergie pour pouvoir les scinder. À l'inverse, en réalisant la fusion de ces noyaux, on peut produire de l'énergie. La somme des masses de petits noyaux est plus grande que la masse du noyau issu de leur fusion. C'est ce processus qui est à la base de la production d'énergie des étoiles.



Régime thermonucléaire : Taux de réaction de divers processus de fusion en fonction de la température.



ITER vers une future source d'énergie?



Andreï Sakharov

Né à Moscou le 21 mai 1921, il effectue des recherches sur les armes thermonucléaires et entre à l'Académie des sciences d'URSS en 1953. Il participe à la mise au point de la bombe à hydrogène soviétique mais s'oppose quelques années plus tard à la poursuite des expériences nucléaires. En 1966, il rallie l'intelligentsia dissidente au régime soviétique en place et crée en 1970 le Comité pour la défense des droits de l'homme, ce qui lui vaut le prix Nobel de la paix en 1975. Déchu de ses titres et de ses fonctions, il est assigné à résidence à Gorki et surveillé par le KGB de 1980 à 1986. Une fois réhabilité, il est élu en 1988 au présidium de l'Académie des sciences et en 1989 au Congrès des députés du peuple. Il meurt le 14 décembre 1989 à Moscou... un peu plus d'un mois après la chute du mur de Berlin.



Le premier Tokamak soviétique.

Un demi-siècle de confinement magnétique

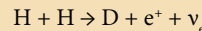
Les recherches sur la fusion contrôlée ont vraiment commencé dans les années 50. Elles visaient à provoquer la **réaction de fusion** la plus favorable, celle **entre le deutérium et le tritium** (DT), dans un plasma ténu, chaud et isolé de toute paroi par un champ magnétique de confinement. La température d'allumage, telle que le chauffage par les produits de réaction chargés compense les pertes inévitables de chaleur par rayonnement, est de $4,5 \cdot 10^7$ K. Une température de fonctionnement raisonnable est 10^8 K. Un bilan d'énergie positif est alors obtenu si le plasma est suffisamment dense et stable. On utilise le produit de la densité du plasma par le temps pendant lequel on a pu l'obtenir pour décrire le fonctionnement du réacteur.

Les premières années furent de grande créativité : on essaya nombre de configurations, mais les succès furent modestes. L'horizon s'éclaircit en 1968. Une machine imaginée par **Andreï Sakharov** et depuis longtemps à l'étude à l'Institut Kourchatov de Moscou sous la direction de Lev Artsimovitch, le TOKAMAK (pour TOroidalnaia KAMERA i MAGnetnaia Katouchka, soit chambre torique et bobine magnétique), avait fourni des valeurs apparemment reproductibles de la température électronique (c'est-à-dire celle du plasma) et du temps de confinement (la « durée de vie » du plasma) : 10 millions de Kelvins et 20 millisecondes, respectivement (soit un ordre de grandeur à peine des 10^8 K nécessaires). Confirmés par une équipe britannique dépêchée sur place, ces résultats étaient bien meilleurs que tous ceux qui avaient été obtenus par ailleurs.

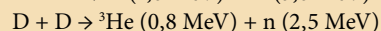
Ce fut le point de départ du développement d'une véritable filière. À partir de 1970, des installations de plus en plus grosses et performantes ont été construites et exploitées de par le monde. L'un des buts de ces expériences

Réactions de l'hydrogène et du deutérium

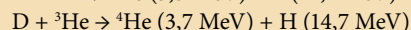
La réaction proton-proton (qui a lieu au cœur du Soleil et des autres étoiles) :



produit un noyau de deutérium ($D = 1$ proton + 1 neutron). Celui-ci est une curiosité naturelle : stable mais peu lié, il entre dans des processus dont les sections efficaces sont les plus grandes des réactions de fusion. Le deutérium agit d'abord sur lui-même selon deux voies également probables :



produisant soit un tritium (T), hydrogène superlourd (un proton et deux neutrons), soit un hélium 3 (${}^3\text{He}$, deux protons et un neutron). Ces noyaux peuvent à leur tour réagir avec le deutérium pour fournir de l'hélium 4 et une grande quantité d'énergie :



La réaction DT est la plus intéressante. Elle est la seule envisagée dans les projets actuels. Le deutérium existe en abondance dans les océans : un verre d'eau lourde (molécule de D_2O contrairement à l'eau normale composée de la molécule de H_2O) par m^3 d'eau de mer. Le tritium, radioactif, doit être produit en bombardant du lithium avec des neutrons. C'est pour cela que la couverture d'un réacteur thermonucléaire doit incorporer du lithium afin de régénérer le tritium, combustible de la réaction.



ITER vers une future source d'énergie?

était de trouver les quantités qui régissent le temps de confinement de l'énergie et leurs dépendances. Tous les résultats montrent un effet simple de taille : la machine est d'autant plus performante qu'elle est plus grosse. En trente ans, trois générations de **tokamaks** de taille croissante se sont succédées. En raison du prix de construction et du coût d'exploitation, la troisième génération n'a donné lieu qu'à trois machines : en Europe le JET (Joint European Tokamak), aux États-Unis TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor, stoppé en 1997 une fois ses objectifs atteints) et enfin JT-60 au Japon.

L'introduction du tritium dans le plasma s'accompagne de contraintes liées à la radioactivité propre de cet isotope du noyau d'hydrogène et à l'activation de certains matériaux devenant radioactifs après l'absorption des neutrons de 14 MeV produits lors des réactions de fusion. C'est pourquoi cette opération est toujours envisagée avec circonspection et n'a été planifiée que vers la fin des programmes expérimentaux de TFTR et de JET. TFTR a fourni 10 MW de fusion DT en 1993. Cette performance fut dépassée en 1997 par le JET avec un résultat de 16 MW de fusion DT pour 25 MW de chauffage auxiliaire, c'est-à-dire dépensés pour faire fonctionner la machine.

Quel chemin parcouru depuis les débuts ! Deux ordres de grandeur gagnés sur le produit densité-temps et deux autres sur la température. Cependant, les tokamaks construits jusqu'à aujourd'hui consomment toujours plus d'énergie qu'ils n'en produisent.

- 1973-75 **Élaboration du projet**
- 1975-77 **Discussions pour le choix du site**
- 1983 **Premier plasma**
- 1991 **Première expérience DT**
- 1997 **P_{fusion} : 16 MW (DT), Énergie : 13 MJ.**
- 2000 **Rétrocession à la Grande Bretagne**

Les grandes dates de la vie du JET, toujours en service en 2008. Construire puis exploiter un grand Tokamak est une entreprise extrêmement lourde sur tous les plans : scientifique, technique, administratif et bien entendu financier.

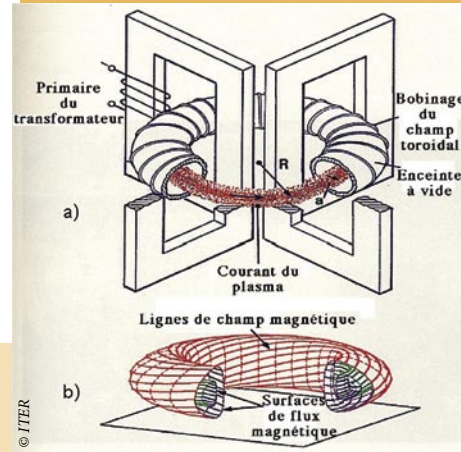


Schéma de principe d'un tokamak :

- a) le transformateur et sa cage ;
- b) surfaces magnétiques

Tokamak

La mise en œuvre du Tokamak commence par la réalisation d'un vide extrêmement poussé dans la chambre torique qui contiendra le plasma. Puis on emplit la chambre du gaz désiré pour l'expérience (hydrogène, deutérium ou hélium) à la pression requise (quelques millitorrs, millièmes de la pression atmosphérique). Les bobinages créant un champ magnétique de confinement et le champ de compensation sont alimentés en courant quasi continu. On connecte alors le primaire du transformateur à un générateur d'impulsions. Le champ d'induction est suffisant pour mettre en mouvement les quelques électrons libres toujours présents, les accélérer, puis par un processus d'avalanche provoquer l'ionisation du gaz qui devient ainsi conducteur d'électricité, en obtenant une densité électronique de 10^{19} à 10^{20} m^{-3} .

Pendant la montée du courant, le plasma s'échauffe progressivement par effet Joule. Il devient de plus en plus conducteur au point que dans toutes les machines exploitées à ce jour, lorsque la température électronique atteint environ $2 \cdot 10^7 \text{ K}$, la résistivité du plasma, excessivement faible, se compare à celle des supraconducteurs. L'effet Joule est alors inopérant. Pour atteindre des températures plus élevées, il convient d'injecter de l'énergie dans le plasma. Le tokamak est ainsi accompagné de systèmes de chauffage auxiliaires par arrosage avec des ondes électromagnétiques de haute fréquence ou par injection de particules neutres que nous allons à présent expliquer.

Il a été relativement aisé de développer des générateurs de puissance adaptés aux fréquences en jeu. Il faut en effet que le plasma absorbe plusieurs mégawatts de radiofréquences pour obtenir l'élévation de température désirée. Des antennes alimentées par des circuits haute fréquence ou des guides d'ondes sont disposées à l'intérieur de l'enceinte à vide de façon à irradier le plasma selon les directions les plus favorables au chauffage. Un autre usage des ondes est la génération non inductive de courant permettant de prendre le relais de l'impulsion envoyée dans le transformateur et d'amorcer un régime quasi continu.

Autre procédé de chauffage du plasma : l'injection de particules neutres d'une énergie largement supérieure à l'énergie thermique du milieu dans lequel elles pénètrent (en pratique 100 keV à 1 MeV) peut servir en plus à compenser les pertes de particules. Une bouteille magnétique étant étanche dans les deux sens, il est nécessaire de rendre les ions électriquement neutres pour qu'ils puissent aller jusqu'au cœur du plasma, or on ne sait accélérer que des objets chargés. Un dispositif de formation de faisceaux de particules neutres comporte donc successivement une source d'ions dont le diamètre peut atteindre 1 m, un étage accélérateur, un étage de neutralisation et un dispositif pour l'élimination des ions résiduels. En entrant dans le plasma, les neutres sont d'abord ionisés. Les ions ainsi formés vont céder leur énergie par collisions successives.



ITER vers une future source d'énergie?

Rapport Q

La performance d'un tokamak fonctionnant avec le mélange deutérium-tritium est donnée par le rapport Q de la puissance de fusion à la puissance de chauffage fournie de l'extérieur. Ce rapport s'est rapproché de l'unité dans le JET et devrait atteindre 10 dans ITER pendant un temps court de 400 secondes.

Vers ITER

Mis en service dans les années 80, les Tokamaks de troisième génération ont donné leur pleine mesure dans les années 90. Les résultats obtenus ont été utilisés pour préparer l'étape suivante : ITER.

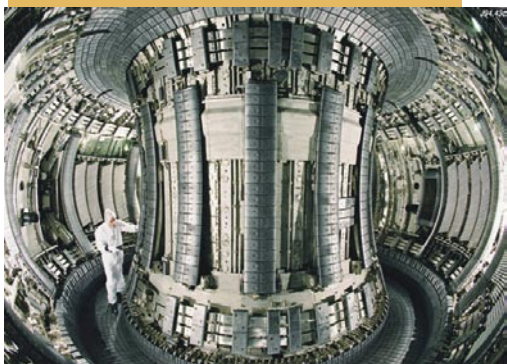
À de rares exceptions près, les recherches sur la fusion ont été menées par de grands organismes nationaux ou au sein de la structure européenne Euratom. L'augmentation de taille des machines entraînant celle de leur coût, le niveau de décision s'est élevé à proportion. Aux U.S.A. les décisions sur le choix de TFTR, sa construction puis sa fermeture ont été prises par le gouvernement fédéral tandis que la communauté européenne prenait à son compte le projet JET.

Plus spectaculaire encore de ce point de vue fut le lancement du projet ITER après la rencontre au sommet, tenue en Islande en 1986, entre Ronald Reagan et Mikhaïl Gorbatchev. Comment mieux marquer le début d'une ère nouvelle des relations entre l'Est et l'Ouest sinon par une entreprise commune de longue haleine sur un objectif ambitieux – sans être vital à court terme – et impliquant une réelle et permanente coopération ? La fusion magnétique offrait une opportunité idéale.

Mais lorsqu'en 1998, le devis lui a été présenté en même temps que les plans de la machine, le Comité Directeur du projet ITER a reculé devant l'ampleur de la dépense : environ 7 milliards de dollars de l'époque, sans garantie de non-dépassement, pour un allumage incertain. Peut-être l'aurait-il approuvé si la prise de conscience par l'opinion de la menace du changement climatique avait été au niveau actuel. D'un autre côté il ne pouvait être question d'abandonner la filière Tokamak. C'eût été un énorme et immérité constat d'échec, condamnant pour des décennies la voie du confinement magnétique. Les progrès accomplis en 30 ans n'avaient mis à jour aucune raison sérieuse d'agir ainsi. En particulier rien n'était venu contredire le bien fondé des lois d'échelle. Alors, les responsables se sont ralliés à une demi-mesure. Les dimensions d'ITER ont été réduites par rapport au projet initial de sorte que le volume du plasma n'est plus que 800 m³ au lieu de 2 000. De même, la puissance de fusion attendue est abaissée à 500

MW contre 1-500 prévus initialement. L'allumage, qui permet l'auto-entretien de la réaction sans recours à des chauffages auxiliaires, est reporté à des temps meilleurs.

On peut s'interroger sur la pertinence d'une telle démarche. Repartir pour un tour dans ces conditions est-il de bonne politique ? Mais selon Paul-Henri Rebut, directeur du JET et ancien chef de projet d'ITER, les



Intérieur du JET.

Paramètres	Tore Supra	JET	ITER	DEMO
Grand rayon du plasma (m)	2.25	3	6.21	6.5 < R < 8.5
Petit rayon du plasma (m)	0.7	1.25	2.0	2 < a < 3
Volume du plasma (m ³)	25	155	837	> 1 000
Courant plasma (MA)	1.7	5-7	15	> 20
Champ magnétique (T)	4.5	3.4	5.3	> 5
Durée du plasma	180 s	10 s	> 300 s	1 h
Type de Plasma	D-D	D-D / D-T	D-T	D-T
Puissance thermonucléaire (Pth)	~ kW	50kW/ 16MW	500 MW	> 2 GW
Q = Pth / puissance de chauffage	~ 0	~1	10	> 30
Puissance neutronique au bord	20 W/m ²	60 kW/m ²	0.6 MW/m ²	> 5 MW/m ²

Tokamakologie comparée : les principaux paramètres de Tore Supra, JET, ITER.



ITER vers une future source d'énergie?

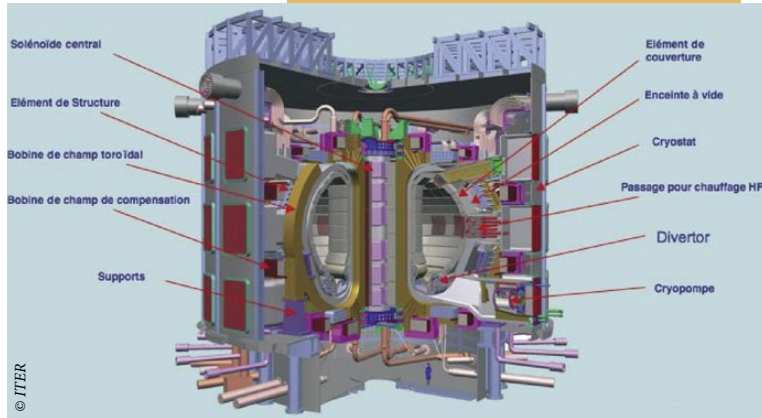
méthodes de travail et l'articulation des équipes étaient mal adaptées à un projet aussi ambitieux. La machine aux objectifs limités, aujourd'hui en construction, est sans doute ce que l'on pouvait concevoir et réaliser de mieux à l'époque.

ITER

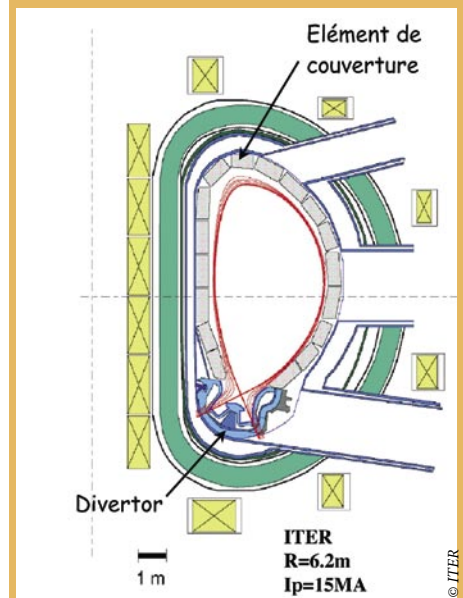
La décision de construire ITER a été prise en 2003. Le site, choisi en 2005 après une recherche menée au niveau mondial, est situé en France en lisière du Centre CEA de Cadarache (dans la vallée de la Durance) où est implanté depuis les années 1980 le tokamak Tore-Supra. Le premier plasma est prévu vers 2016. Puis une dizaine d'années s'écoulera avant d'atteindre le fonctionnement à plein régime sous tritium.

Le projet vise un **rapport Q** (qui mesure le rendement de la machine) de l'ordre de 10 pour une puissance de fusion DT de 500 MW pendant 400 secondes. Ce sera donc un banc d'essai à objectifs multiples avant l'étape décisive de la production d'électricité.

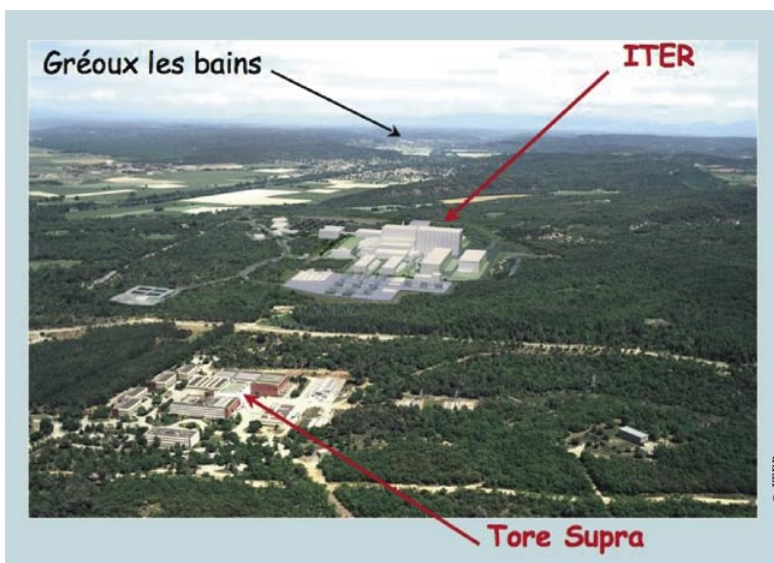
Le dessin d'ITER (voir ci-contre) adopte une section méridienne en forme de D (comme le JET) et intègre trois éléments majeurs : un solénoïde supraconducteur, un divertor destiné à éliminer les produits de réaction ainsi que les impuretés du plasma et enfin un dispositif de récupération de l'énergie de fusion, la couverture. Les deux premiers éléments ont déjà été expérimentés. Les supraconducteurs ont fait leurs preuves sur le Tore-Supra, les divertors sur le JET et JT-60, après des premiers essais sur de petits tokamaks. La couverture sera mise en œuvre pour la première fois. Modulaire, ses éléments sont traversés par un fluide de refroidissement dont la température ne dépassera pas 100 à 150°C en service normal ce qui est insuffisant pour faire tourner une turbine couplée à un générateur



Vue éclatée d'ITER avec, en bleu, la silhouette d'une personne donnant une idée de l'énorme taille de l'ensemble.



Disposition de la couverture et du divertor dans ITER. Les ions indésirables sont guidés jusqu'à des absorbeurs par les lignes de champs des surfaces magnétiques ouvertes.



Le site d'ITER à Cadarache avec les projets des bâtiments de ITER dessinés



ITER vers une future source d'énergie?

Du simple fait qu'il met en œuvre des réactions nucléaires, ITER est source de craintes. Au moindre incident, le plasma très ténu se refroidit immédiatement et la réaction est bloquée net. La crainte d'une explosion est donc totalement infondée. Quant au problème de la radioactivité, il est sans commune mesure avec celui des réacteurs à fission. Le tritium est bien radioactif, mais les quantités manipulées (avec des précautions renforcées par toute l'expérience acquise au JET) se comptent en grammes. Par contre les neutrons de 14 MeV activent les matériaux de structure et cette radioactivité résiduelle perdue après l'arrêt définitif de l'installation qui ne sera donc démantelée qu'au bout de quelques décennies. Le site reviendra alors à son état d'avant le chantier.

électrique. Certains de ces modules comporteront du lithium en vue de la régénération du tritium par réaction des neutrons sur les parois.

Réactualisée, la note à payer par l'ensemble des nations partenaires s'élève à cinq milliards d'euros d'investissements jusqu'à la mise en service. Cinq autres milliards seront nécessaires pour 15 à 20 ans d'exploitation à partir de 2016, suivis du démantèlement de l'installation.

Après ITER ?

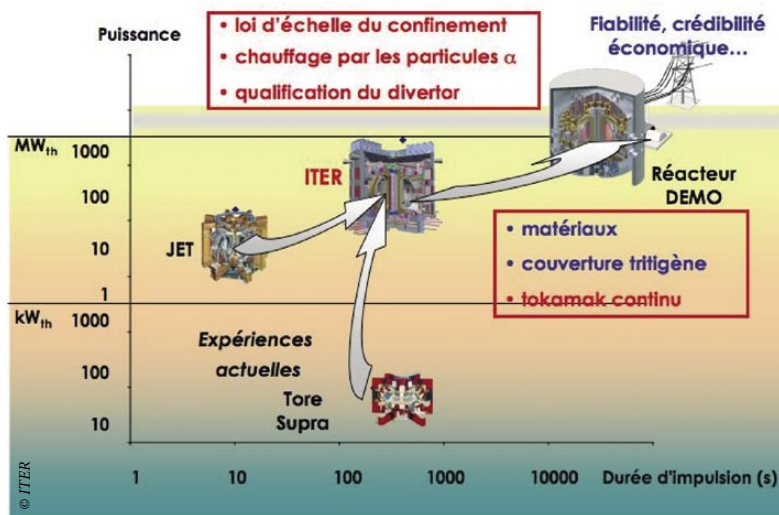
Dans ses ambitions premières, ITER visait, à échéance 2010-2020, la démonstration de l'allumage de la réaction thermonucléaire confinée. Cela aurait constitué l'équivalent de ce que fut pour la fission la divergence de la réaction en chaîne obtenue le 2 décembre 1942 à Chicago par Enrico Fermi. Dans le calendrier actuel, ce pas ne sera franchi qu'après 2030 avec un réacteur de démonstration, DEMO, destiné à produire de l'électricité. Tous les aspects scientifiques et techniques de la filière tokamak auront été mis à l'épreuve sur ITER, sauf un : la tenue des matériaux (notamment ceux de la première paroi) au flux de neutrons de 14 MeV émis par le plasma en

réaction. Dans ITER, celui-ci est comparable à celui rencontré dans un réacteur à fission à haut flux. Il sera 10 fois plus important dans DEMO. Pour cette raison, une installation spécifique, IFMIF (pour International Fusion Material Irradiation Facility), doit être construite au Japon pour un coût de l'ordre de 15% des investissements du programme ITER. Le flux de neutrons y sera créé par l'impact de deutérons accélérés jusqu'à une énergie de 40 MeV sur des cibles de lithium ou de béryllium.

DEMO, contemporain des réacteurs à fission de quatrième génération, devrait donc apporter la preuve expérimentale qui manque toujours : allumer de façon contrôlée les réactions thermonucléaires. Le construire et le faire fonctionner prendra du temps, en plus du délai nécessaire à la prise de décision. Après seulement, il deviendra possible d'envisager le passage au stade industriel, processus

qui, on le sait d'expérience, ne dure jamais moins d'une vingtaine d'années. Encore faudra-t-il que loin dans la seconde moitié du XXI^e siècle, le réacteur à fusion soit compétitif par rapport aux autres sources d'énergie alimentant le réseau électrique.

Sera-ce toujours un tokamak ? Peut-être. Mais si les efforts de recherche sur la fusion ont été concentrés sur cette configuration, c'est parce qu'à la fin des années 1960, elle était supérieure à toutes les autres. Rien ne dit qu'un siècle plus tard il en sera toujours ainsi. D'autres configurations magnétiques, mais aussi la voie inertielle (qui consiste à comprimer et à chauffer une très petite masse de DT jusqu'à 10 000 fois la densité du liquide et à quelques keV de température afin qu'elle explose) ou encore des réacteurs hybrides utilisant la fusion et la fission pourraient représenter l'avenir de cette forme d'énergie nucléaire.



Des tokamaks actuels (Tore Supra et JET) à DEMO, ou comment se dessine l'avenir de la filière. Les encadrés recensent les principaux objectifs de recherche relatifs à chaque étape. La mise en service de DEMO pourrait être contemporaine de la quatrième génération des réacteurs à fission.