

**Communication  
de Monsieur Bernard BIGOT**



**Séance «hors les murs» du 18 janvier 2007**



**ITER, la fusion nucléaire : une énergie d'avenir ?**

ITER est un grand projet international de recherche qui représente une étape essentielle sur le chemin de la maîtrise de l'énergie de fusion thermonucléaire sur terre. Installé à Cadarache, à deux pas de la Montagne Sainte Victoire, près de Aix-en-Provence, il a l'ambition de préparer l'arrivée d'une nouvelle forme d'énergie comparable toutes proportions gardées à celle du soleil en termes de durée, d'abondance et de respect l'environnement et du climat.

La fusion thermonucléaire est le mode de production de l'énergie du soleil et des étoiles.

La fusion thermonucléaire est le phénomène le plus commun et le plus ancien de production d'énergie dans l'Univers. En effet, 99,9% de la matière visible est sous la forme de plasma, cet état de la matière formé de noyaux atomiques et d'électrons circulant, quasi indépendamment les uns des autres, à très grande vitesse.

Cet état, le quatrième, au-delà des états gazeux, liquide et solide, est nécessaire à cette fusion.

La fusion thermonucléaire en fonctionnement quasi-continu et réalisée à l'initiative des hommes n'existe pas aujourd'hui sur terre, mais, si l'on réfléchit bien, pratiquement, hors l'énergie nucléaire de fission et celle des marées, toutes les énergies dont dispose l'homme sur Terre, depuis l'origine de la vie, sont une forme dérivée de l'énergie de fusion, via le rayonnement solaire, le plus souvent en bénéficiant d'un stockage intermédiaire. Songeons à l'utilisation de la biomasse et des énergies fossiles qui sont une forme concentrée élaborée

sur des millions d'années et que nous utilisons à un rythme qui les épuisera en deux ou trois siècles, songeons à l'énergie mécanique ou autre, d'origine animale ou humaine, qui provient d'une alimentation basée sur la consommation des végétaux, ou de leurs dérivés, produits par photosynthèse.

Songeons à la chaleur et la lumière solaires directes. Songeons à l'énergie photovoltaïque, à l'énergie éolienne ou à l'énergie hydraulique...

Le 21<sup>ème</sup> siècle va connaître, sans doute très prochainement, la fin d'une période où l'énergie est abondante et bon marché : 85 % de la consommation mondiale d'énergie marchande provient de combustibles fossiles qui sont en voie d'épuisement rapide. L'énergie est un défi majeur du 21<sup>ème</sup> siècle pour l'avenir de notre planète. Nous consommons à l'échelle mondiale environ 11 millions de tonnes d'équivalent pétrole par an. Cette consommation a été multipliée par 16 au 20<sup>ème</sup> siècle et même les prévisions les plus conservatrices limitant au maximum la consommation individuelle et faisant appel aux économies d'énergie estiment que la consommation mondiale augmentera encore au moins de 50 % en 2030 en raison de l'évolution démographique et de l'évolution du niveau de vie. Or, de l'aveu même des entreprises productrices et distributrices, les prévisions les plus optimistes des réserves de combustibles à un prix de récupération au plus quatre fois plus cher qu'aujourd'hui et avec notre taux de consommation actuelle, sont de 223 ans pour le charbon, 48 ans pour le pétrole, 63 ans pour le gaz et 67 ans pour l'uranium. Si l'on fait abstraction du prix, on passe certes à 124 ans pour le pétrole, 102 ans pour le gaz et 8 000 ans pour l'uranium. Ces échéances ne changent pas profondément la donne, excepté pour le nucléaire de fission, mais qui n'est pas accessible à tous.

Le problème est d'autant plus aigu pour la France que, hors nucléaire, elle importe 92 % de son énergie. L'Europe est également dans une situation particulière de dépendance énergétique préoccupante :

- c'est la région du monde la plus importatrice d'énergie : dépendance à 50 % actuellement ; prévision de 70 % en 2030,
- elle importe 44 % de sa consommation de gaz, ses réserves représentent 2 % des réserves mondiales alors que sa part dans la consommation mondiale actuelle est de 18 % ; ses importations passeraient à 70 % en 2030,
- elle importe 75 % de sa consommation de pétrole ; cette part passerait à 93 % en 2030.

Mais il y a d'autres raisons de considérer l'urgence à réagir. C'est le réchauffement climatique dû à la consommation massive des énergies fossiles. Au-delà du problème de la ressource, il y a les enjeux climatiques et environnementaux.

L'utilisation massive des combustibles fossiles porte sérieusement atteinte à notre environnement, à notre santé et au fonctionnement de la planète : gaz acides, pollutions diverses, gaz à effet de serre... Nous avons des données scientifiques aujourd'hui très solidement établies qui font que jamais dans l'histoire de l'humanité nous nous sommes trouvés dans la situation de mesurer avec une telle précision l'impact de notre comportement collectif sur le fonctionnement de la planète. Le dioxyde de carbone a vu son taux dans atmosphère augmenté de 50 % en 1 000 ans, celui de méthane de 100 % sur la même période. Nous le savons grâce aux prélèvements de glace dans les calottes polaires de l'Antarctique qui permet de mesurer les variations de concentration de ces gaz à effet de serre. Celles-ci, certes naturelles et beaucoup plus faibles que celles constatées depuis cent ans, sont directement corrélées avec les variations de température et du niveau des mers. Aujourd'hui les meilleures prévisions par les chercheurs du monde entier du réchauffement de l'atmosphère sont de + 1,5 à + 4°C en 2100. Les effets de ces concentrations excessives sont à durée longue, plusieurs centaines d'années, même si nous arrêtons de rejeter ces gaz à effet de serre dans les proportions actuelles, il faut «décarboner» notre mode de vie, si on veut respecter un fonctionnement de la planète compatible avec le type de vie que nous connaissons depuis des milliers d'années...

Nous avons besoin d'une nouvelle stratégie !

Il faut s'inscrire dans la logique du concept de développement durable avec la réduction drastique qui en résulte en matière de consommation des combustibles fossiles et d'émissions de CO<sub>2</sub> : l'objectif nécessaire et raisonnable est de les diviser par 4 avant 2050.

Pour cela, il y a deux manières de procéder :

1. Se donner des objectifs d'économie d'énergie : éducation + innovation technologique + nouvelle organisation économique et sociale
2. Se donner des objectifs de diversification des sources d'énergies en privilégiant les énergies propres :
  - énergies renouvelables : biomasse, solaire, éolien...
  - capture/séquestration du CO<sub>2</sub> produit par la combustion du charbon et des hydrocarbures,
  - vecteur hydrogène et piles à combustibles,
  - systèmes nucléaires du futur : fission à neutrons rapides, fusion.

ITER est donc une étape vers cette utilisation de la fusion dans une logique de développement durable.

ITER a l'ambition l'ouvrir la voie à l'utilisation de l'énergie de fusion comme source massive de production d'énergie électrique durant ce siècle. Cette utilisation repose sur le maintien en quasi-continu, dans un réacteur torique de grande dimension, d'un plasma, très chaud (plus de 100 millions de degrés) et sous une pression quasi-atmosphérique, de tritium et de deutérium, deux isotopes de l'hydrogène, le premier obtenu à partir du lithium, directement dans le réacteur industriel, et le second à partir de l'électrolyse de l'eau.

La fusion consiste à faire rentrer en collision à très grande vitesse deux noyaux d'atomes légers d'hydrogène, ou plus précisément de ses deux isotopes, le deutérium (D) et le tritium (T), à l'état de plasma, et qui vont produire un noyau d'hélium et un neutron très énergétique. Les conditions de la fusion magnétique sont :

- une température de 100 à 150 millions de degrés, soit environ 10 fois la température du centre du soleil
- une densité d'environ  $10^{20}$  atomes/m<sup>3</sup>, soit un millionième de la densité atmosphérique
- un temps de confinement, c'est-à-dire le temps avant que l'énergie de fusion ne quitte le petit volume autour de la collision qui priverait la poursuite de la fusion, de quelques secondes

L'énergie de fusion est incroyablement concentrée, environ 4 fois plus dense que l'énergie de fission, et 40 millions de fois plus dense que l'énergie de combustion de CH<sub>4</sub>. 1 kilogramme de combustible DT correspond à 18 000 tonnes de charbon !

Au sein des étoiles comme du soleil, la fusion thermonucléaire est rendue possible par le jeu des forces gravitationnelles. Elles exercent une pression si considérable au cœur du soleil sur les noyaux d'hydrogène qui s'y trouvent (la pression a une valeur 10 milliards de fois plus grande que la pression atmosphérique sur Terre, le Soleil ayant une masse un milliard de fois plus grande que la terre) qu'elles les obligent à fusionner pour donner des noyaux de deutérium ou d'hélium en libérant une énergie considérable qui maintient au sein du plasma ainsi formé une température de 15 millions de degrés au centre et de 6 000 degrés à la périphérie du soleil. Cela fait 5 milliards d'années que la réaction est entretenue et on prévoit qu'elle durera encore autant. Sur Terre, il est impossible de faire appel à de telles forces gravitationnelles, personne ne sachant y accumuler la masse nécessaire (voir ci-dessus la masse du Soleil) pour des raisons évidentes ?

Les physiciens qui ne manquent pas d'ingéniosité ont alors cherché du côté des forces électromagnétiques, une autre catégorie des grandes forces naturelles

qui agissent essentiellement sur les particules chargées telles que celles existant dans un plasma.

Voici, à grands traits, l'histoire de cette découverte.

Dès 1940, eurent lieu aux Etats-Unis d'Amérique, les premières expériences de confinement magnétique d'un plasma. En 1968, des chercheurs russes font la découverte d'une configuration torique magnétique (tokamak) qui permet pendant une durée d'une milliseconde de produire le premier plasma H-D. Puis, en 1987, après près de 20 ans de progrès, au sortir de la guerre froide, les plus hauts responsables politiques du moment, Gorbatchev, Reagan, Tanaka, Mitterrand, proposent le lancement d'une réflexion pour promouvoir un projet international appelé ITER. En 1991, on réussit à obtenir une puissance de fusion de 1,7 MW produite dans l'installation européenne dite du Joint European Torus (JET), construit par un ingénieur français, Paul Rebut, et ce avec, pour la première fois, un plasma D-T. En 1997, on obtient 16 MW d'énergie de fusion, record mondial jusqu'à ce jour. En 2003, avec un plasma H-D, on obtient un plasma d'une durée longue de 400 secondes sur Tore Supra, l'équipement français installé à Cadarache, avec injection et extraction d'une énergie d'un gigajoule (puissance de 2,5 MW).

Et c'est en 2006, après de longues et difficiles négociations, qu'a lieu à Paris, le 21 novembre, à l'invitation du Président de la République, la signature de l'accord international ITER et lancement de la construction de la machine.

Mais avant de parler de cela, revenons un peu en arrière pour expliquer ce qu'est la machine ITER, le fameux Tokamak.

Pour cela, il faut expliquer ce qu'est le confinement magnétique. Si on crée un champ magnétique rectiligne du même type que celui que crée localement un gros aimant pour orienter une boussole, les noyaux du plasma vont progresser selon une trajectoire en s'enroulant autour des lignes de champ, c'est à dire en formant une hélice sans fin dont l'axe est la ligne de champ. Naturellement, ceci ne saurait convenir puisque l'on perdrait sans cesse le contenu du plasma, à moins de mettre des miroirs magnétiques efficaces à chacune des extrémités du tube de champ. Ceci a été tenté avec succès pour un plasma de faible énergie, mais ceci est impossible pour les températures nécessaires à la production de l'énergie de fusion,

L'idée est alors de refermer sur elles-mêmes les lignes de champ magnétique pour former un tore, espèce de chambre à air magnétique. Cela n'est pas suffisant dans la mesure où la courbure des lignes de champ crée une force qui tend à faire que la trajectoire des noyaux du plasma quitte le volume du tore, en formant à nouveau une hélice mais d'axe perpendiculaire à la première.

Pour les obliger à rester dans le volume du tore, il suffit alors de torsader les lignes de champ sur la surface du volume du tore, comme dans son volume. Ce choix s'est révélé pertinent, en donnant lieu au concept de Tokamak, ce qui, en russe, veut dire « machine à courant ». Pour cela, il suffit donc de disposer autour du tore des bobines toroïdales (18 dans ITER). Ce sont des aimants sous forme d'anneaux qui enserrant le volume du tore comme une bague un doigt. Ceci crée des lignes de champ magnétique circulaires. Grâce à ce dispositif, complété par un aimant dont l'axe est perpendiculaire au plan moyen du tore et qui est placé en son centre, on crée un courant de plasma. A son tour, ce courant crée un champ poloïtal circulaire qui enserre le volume du tore et assure ainsi les torsades attendues.

Les lignes de champ magnétique créent des surfaces magnétiques fermées. Les ions et les électrons du plasma s'enroulent sur les lignes de champ. Le plasma est confiné à l'intérieur des surfaces magnétiques qui assurent aussi une large part de son isolation thermique. Pour cela, le champ magnétique doit avoir une valeur élevée : de l'ordre de 200 000 fois le champ terrestre.

Désormais, le Tokamak est une solution démontrée !

On porte le gaz à la température nécessaire pour créer le plasma et démarrer la réaction de fusion.

La réaction de fusion produit les particules alpha (les noyaux d'hélium) qui assurent d'entretien partiel ou total (ignition) de la température du plasma. La pression interne du plasma est compensée par les forces électromagnétiques.

Quels combustibles faut-il utiliser ? Les plus efficaces sont le deutérium et le tritium. Le deutérium peut être extrait de l'eau et ses réserves correspondent à plusieurs milliards d'années de consommation mondiale. Le tritium peut être produit par la rencontre entre du lithium avec le neutron de 14,1 MeV produit par la réaction de fusion D-T. On a donc deux réactions couplées dont le bilan global est : Deutérium + Lithium  $\rightarrow$  2 Hélium avec production d'une énergie de 22,4 MeV.

Le lithium terrestre est plus abondant que l'étain ou le plomb et dix fois plus abondant que l'uranium. Le lithium peut aussi être tiré de l'eau de mer (0.17g. m<sup>3</sup>).

Les ressources en lithium terrestre sont de l'ordre du millier d'années. Cette limite est repoussée à plusieurs millions d'années si le lithium est tiré de l'eau de mer.

Il suffit de 100 kg de deutérium et 350 kg de lithium pour constater le combustible nécessaire pour faire fonctionner une centrale électrique de 1GWe

pendant un an. Il faudrait, pour produire la même énergie, 12 millions de tonnes pour une centrale au charbon et 12 tonnes d'uranium.

Quelles conséquences a le choix de tels combustibles au plan de la radioactivité? Le tritium est radioactif  $\beta$ . Il a une période 12,3 ans en émettant des rayonnements d'énergie 19 keV, mais il sera en très faible qualité à tout instant dans le réacteur, ayant vocation à disparaître au fur et à mesure où il sera formé.

Le lithium, le deutérium et l'hélium sont non radioactifs. Les noyaux d'hélium constituent l'émission  $\alpha$  avec une énergie de 3,6 MeV, Ils servent essentiellement à assurer le chauffage du plasma. Ils sont totalement arrêtés par les parois et ne présentent donc pas de risque au titre de la radioactivité.

Les neutrons produits ont une énergie initiale de 14,1 MeV. Ils perdent cette énergie dans les parois et les structures externes en acier par exemple qu'ils activent. Des radionucléides sont donc produits. Ils émettent à leur tour un rayonnement ionisant (émissions  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) dont il faut protéger l'environnement et la population qui travaille à l'immédiate proximité. La chance est que les matériaux irradiés se désactivent naturellement en quelques décennies s'ils sont choisis judicieusement. Au-delà de 100 ans, la radioactivité résiduelle est aussi faible que celle que produiraient les cendres de la quantité de charbon qui aurait été nécessaire pour produire la même quantité d'énergie.

Les étapes marquantes dans la production d'énergie de fusion (D/T) sur ces bases sont prévues être les suivantes :

- JET 1991 (UE), production de 1.7 MW : première expérience mondiale de fusion DT sur Terre ;
- TFTR 1 994 (US), production de 11.5 MW ;
- JET 1997 (EU), production de 16 MW, record mondial et record d'amplification,  $Q \sim 0.65$ , avec chauffage par les  $\alpha$  ;
- ITER (coopération internationale), 2015-2020, production de 500-700 MW avec amplification d'énergie  $Q > 10$
- Réacteur prototype (2035), 1500-2000 MW d'énergie thermique,  $Q \sim 0-50$ .

Jusqu'à ce jour, contrairement à ce que certains pensent, continûment pendant quarante ans des progrès à un rythme exceptionnellement élevé, ont été réalisés. Ces progrès ont été même plus rapides depuis 1965 que la vitesse avec laquelle la puissance des processeurs des ordinateurs a elle-même été, c'est à dire doublement tous les deux ans. Qui plus est, ces progrès ont été pleinement conformes aux prévisions théoriques, par exemple les prévisions pour le temps de confinement du plasma.

ITER, c'est l'ambition d'accomplir une nouvelle étape décisive dans la production d'un plasma de fusion confiné magnétiquement, car de nombreuses questions de physique sont encore ouvertes :

- Auto organisation au sein d'un plasma.
- Stabilité globale du plasma dans des conditions de transport turbulent.
- Auto organisation au sein d'un plasma.
- Tenue des matériaux sous flux extrêmes.
- Reconnexions magnétiques.
- Modes de chauffages (ondes et particules).
- Interactions plasma-surface.
- Mesures non intrusives ...

Par exemple, la conséquence de l'existence simultanée d'un fort champ magnétique et d'une agitation thermique élevée est la création de phénomènes de turbulence avec diffusion de l'intérieur de la décharge vers l'extérieur. Ces phénomènes ont tendance à « vider » la zone de plasma de son contenu en particules et en énergie. Leur maîtrise détermine le temps de confinement de la machine. Cette maîtrise se fera grâce au jeu des aimants poloïdaux. Des simulations sur des ordinateurs puissants, capables de calculs très hautes performances, montrent les améliorations possibles dans ces conditions. C'est cela qu'ITER doit pouvoir confirmer ; il doit permettre l'apprentissage opérationnel correspondant.

Les grandes étapes de ITER sont les suivantes :

- |           |   |
|-----------|---|
| 1985-86   | Décision lors de rencontres Gorbatchev-Mitterrand-Reagan-Tanaka.  |
| 1988-90   | Conception : Euratom, Japon, URSS, USA.   |
| 1992-2001 | Objectif : 1 ,5 GW - 1000 s, puis 500 MW - 400 s.<br>Investissement en R&D d'environ un milliard d'euros.<br>Retrait des USA en 1999. Final Design Report en mai 2001.  |
| 2003      | Retour des Américains et arrivée des Chinois et Coréens.<br>Négociations difficiles à 6 entre janvier 2003 et juin 2005 :<br>Chine, Corée du Sud, Etats-Unis d'Amérique, Fédération de Russie, Japon, Union européenne pour le choix entre 2 sites d'implantation possible : Cadarache, PACA, France ; Rokkasho, Aomori, Japon. |
| 2005      | Accord de Moscou en juin 2005 pour une installation de la machine à Cadarache.  |

Accueil de l'Inde en décembre 2005 en tant que nouveau partenaire. Accord de Jeju sur l'organisation commune et la répartition de l'investissement d'environ 10 G € (valeur 2001) sur environ 40 ans : construction (10 ans), exploitation (25/30 ans), démantèlement.

ITER est un formidable défi.

Songons aux caractéristiques du JET comparées à celles de ITER

	Volume plasma	Puissance fusion	Puissance chauffage	Temps de vie plasma	Intensité plasma
JET	80 m <sup>3</sup>	~16 MW	~23 MW	~30 s	~5-7 MA
ITER	830 m <sup>3</sup>	~500 MW	~50 MW	~30 s	~15 MA

D'intenses travaux de recherche ont été conduits entre 1992-2001. Des prototypes ont été fabriqués et testés à des échelles crédibles. Par exemple, une bobine modèle, échelle ~ 1/3, pesant 40 t dont 4 t de supraconducteur Nb<sub>3</sub>Sn, a été réalisée. C'est à comparer aux 18 bobines de ITER, dont chacune d'entre elles pèsera 290 t dont ~ 19 t de Nb<sub>3</sub>Sn, autorisant une intensité électrique exceptionnelle de 800 A/mm<sup>2</sup>.

Une des clés du progrès, nécessaires au déploiement de la fusion thermonucléaire se trouve dans les matériaux tels que les composants à haut flux d'énergie. Par exemple, on a mis au point un composé carbone-fibre de carbone pour former la surface d'une aiguille activement refroidie avec de l'eau qui permettra le transfert d'énergie contenue dans le plasma. Ce matériau devra résister à des flux de 20 MW.m<sup>2</sup>. Dans un réacteur de fission, le flux est de 0.25/1 MW.m<sup>2</sup>.

La construction et l'exploitation d'ITER à Cadarache (Bouches-du-Rhône) ont donc pour finalité de valider, scientifiquement et technologiquement, les performances opérationnelles de la fusion thermonucléaire contrôlée par confinement magnétique. ITER a l'ambition d'ouvrir la voie à l'utilisation de l'énergie de fusion comme source de production d'énergie électrique durant ce siècle. Cette utilisation repose sur le maintien en quasi-continu, dans un réacteur torique de grande dimension, d'un plasma, très chaud (plus de 100 millions de degrés) et sous une pression quasi-atmosphérique, de tritium et de deutérium, deux isotopes de hydrogène, le premier obtenu à partir du lithium, directement dans le réacteur industriel, et le second à partir de l'électrolyse de l'eau. La France s'est portée candidate à d'accueil de ce grand équipement scientifique par décision du Gouvernement en date du 31 janvier 2003.

Le projet de recherche ITER est mené dans le cadre de la coopération internationale la plus large jamais connue ; elle rassemble la Chine, les États-Unis, la Fédération de Russie, l'Inde, le Japon, la République de Corée et l'Union européenne, soit plus de la moitié de la population mondiale. L'accord pour une durée de 35 ans et qui fixe les différentes contributions (50 % de la construction et 34 % du fonctionnement pour l'UE), après une difficile négociation a été signé par l'ensemble des parties à Paris, le 21 novembre 2006. Il est en cours de ratification parlementaire par le Japon et la Corée, Une fois ratifié, en juin 2007 au plus tard, une organisation internationale, de même nature que les grandes organisations des Nations Unies et responsable de l'ensemble du programme, sera *de facto* créée. Elle aura pour siège Cadarache. Un accord de siège entre cette organisation et la France, après ratification par le Parlement national, sera alors passé pour définir les conditions de son fonctionnement dans notre pays (privilèges et immunités, responsabilité nucléaire, soutien français à son installation...). Il est en cours de négociation avec l'organisation de préfiguration mise en place à compter du 1<sup>er</sup> janvier 2007. L'accord ITER est complété par un accord de partenariat entre le Japon et l'Union européenne, dit de «l'approche élargie», et portant sur un programme complémentaire de recherche sur la fusion (matériaux, modélisation, ...) et comportant trois équipements localisés au Japon. L'accord international de l'approche élargie a été signé le 5 février au Japon et est en cours de ratification par la Diète.

L'organisation de préfiguration, installée sur le site du CEA dans des bâtiments spécialement construits à cet effet, comporte sur place à Cadarache déjà une centaine de personnes et devrait s'élever à plus de 180 avant la fin Juin, Elle est sous la direction d'un directeur général d'origine japonaise, Mr Ikeda, et d'un directeur général adjoint, chef de projet, d'origine européenne (allemande). Mr Holtkamp. L'équipe de direction est complétée par 6 directeurs adjoints représentant les partenaires, hors Japon. L'équipe est en cours de revue technique du projet afin de pouvoir finaliser les plans fin juin et de déposer les demandes l'autorisation à construire avant la fin de l'année. Les travaux de défrichage ont commencé début janvier 2007 et seront terminés avant l'été. Les travaux de construction proprement de l'installation commenceront en 2009.

De la même façon, le programme de l'approche élargie est engagé de manière très concrète avec un chef de projet européen (français) désigné et sur le point de s'installer à Rokkasho Mura.

ITER, dont l'objectif est de produire au moins dix fois plus d'énergie qu'il n'en consommera, s'inscrit dans un contexte marqué à la fois par des besoins énergétiques croissants à l'échelle de la planète et une raréfaction inéluctable des ressources en énergie fossiles qui assurent aujourd'hui plus de 85 % de la

consommation mondiale et dont la combustion massive fait peser la menace d'un changement climatique.

Les atouts de cette filière énergétique se trouvent : dans l'abondance et la large disponibilité du combustible sur l'ensemble de la planète, garantissant une ressource suffisante pour des millions d'années, un gramme de deutérium (33 grammes par m<sup>3</sup> d'eau) produisant par exemple autant d'énergie que 2 tonnes de pétrole ; dans l'absence d'émission de gaz à effet de serre (le produit de la réaction est de l'hélium, un gaz chimiquement inerte et non radioactif) ; dans la sûreté du réacteur dont les principes de fonctionnement excluent tout emballement ; et dans l'existence de solutions pour la gestion des déchets technologiques constitués par les matériaux entourant le plasma, matériaux qui sont rendus radioactifs par le bombardement des neutrons générés par les réactions de fusion. Ces déchets radioactifs générés par l'exploitation de l'installation seront exclusivement des déchets de très faible, faible et moyenne activité (ensemble 95%) ou haute activité (5%) à vie courte (moins de 10 ans),

Au sein de la contribution européenne, la participation financière française au projet ITER - dont le coût global (construction, fonctionnement, démantèlement) est estimé à environ 11 milliards d'euros, valeur 2005 - se ventile ainsi :

- 10% du coût de construction d'ITER estimée, sur 10 ans, à 496 millions d'euros, valeur 2005 ;
- 7% du coût de fonctionnement, de démantèlement et de mise à l'arrêt estimés, sur 25 ans, à 425 millions d'euros, valeur 2005, le premier plasma est attendu pour 2016 ;
- environ 190 millions d'euros pour les aménagements relevant du pays hôte (routes, terrain, école internationale...) ;
- 50% de la part européenne de l'approche élargie, plafonnés à 170 millions d'euros, valeur 2005, sous forme d'apports en nature et dans l'industrie.

Les collectivités locales apportent 467 millions d'euros courants au projet ITER. Pour la France, le coût d'ITER représentera pour le budget de l'Etat environ 30 millions d'euros par an pendant 30 ans par rapport à un budget annuel de recherche d'environ 1 0 milliards d'euros, soit 0,3 % de son budget de recherche.

Il est estimé que la phase de construction d'ITER générera en France l'emploi direct de 500 personnes et l'emploi indirect de 3 000 personnes (dont 1400 en région PACA). Durant la phase d'exploitation, ce sont environ 1 000 personnes qui seront employées directement (600 pour l'exploitation et 400 scientifiques) et 3 250 employées indirectement (dont 2400 en région PACA).

Le projet ITER est structuré selon 3 niveaux :

- l'organisation internationale ITER ou *International Legal Entity* (ILE), dont il est prévu que la France ait un représentant au sein des 4 membres européens de son conseil d'administration,
- le niveau propre à chacun des 7 partenaires avec, pour l'Europe, une agence de passation de contrats industriels, *l'European Legal Entity* (ELE), entreprise commune installée à Barcelone et responsable de la fourniture des composants de ITER qui incombent à l'Union européenne (l'accord sur les statuts au niveau du conseil européen est acquis depuis le 8 mars),
- la France en tant que pays d'accueil qui a créé l'Agence ITER France, sous forme d'une unité spécialisée au sein du CEA. Elle a pour rôle de reverser à l'ELE une partie des moyens français, provenant des collectivités locales, de l'Etat et du CEA, de préparer le site d'accueil, d'assurer l'interface technique et opérationnelle vis-à-vis de l'ELE et de l'ILE, puis la maîtrise d'ouvrage du démantèlement de l'installation. Aux bonnes fins de coordination nationale et régionale et de représentation de la France auprès des partenaires du projet ITER, une mission nationale ITER a été instituée sous la direction de François d'Aubert, ayant rang d'ambassadeur en tant que haut représentant français pour ITER.

La France, bien que n'étant pas partenaire direct de l'accord ITER, est un partenaire indirect important dans le cadre de l'engagement pris par l'Union Européenne, en tant que pays hôte, et également, à ce titre, dans le cadre de l'accord de siège qui sera passé entre l'ILE et la France. A tous égards, la France doit prendre les dispositions relevant de sa responsabilité pour faire de ce projet une réussite exemplaire de coopération scientifique internationale, poursuivant ainsi l'action menée depuis de nombreuses années, et tout particulièrement depuis 2003.

En conclusion, depuis le déblocage de la situation sur le choix du site intervenu le 25 juillet 2005 à Moscou, l'esprit de coopération indispensable à la réussite de ce grand projet particulièrement ambitieux scientifique à la hauteur des espoirs qu'il suscite, a toujours prévalu et va pouvoir désormais s'exercer pleinement.

Les 21<sup>ème</sup> / 22<sup>ème</sup> siècles auront à affronter un changement majeur dans leur accès à l'énergie. ITER est d'abord un défi scientifique et technologique considérable qui a besoin du concours de chercheurs et ingénieurs de très hautes compétences. ITER peut ouvrir la voie à l'utilisation de la fusion thermonucléaire contrôlée pour produire une énergie abondante dans des conditions respectueuses de l'environnement, et ce, pendant des millénaires.