

FUSION NUCLEAIRE ET PROJET ITER

INTRODUCTION :

Un enfant qui naît aujourd'hui verra s'éteindre une part importante de nos ressources énergétiques naturelles. Aujourd'hui 87% de notre énergie provient de ressources non renouvelables (Charbon, pétrole ...). En France 75% de la production française d'électricité provient du nucléaire. C'est-à-dire par l'exploitation des réactions de fission des atomes d'Uranium à l'aide de neutrons, or l'uranium même si on en parle moins que le pétrole est aussi une source d'énergie dont les réserves ne sont pas inépuisables. En prenant en compte les niveaux de consommation actuels, les réserves prouvées en pétrole sont évaluées à 40 ans, 70 ans pour le gaz, 230 ans de charbon, et environ 50 ans pour l'uranium.

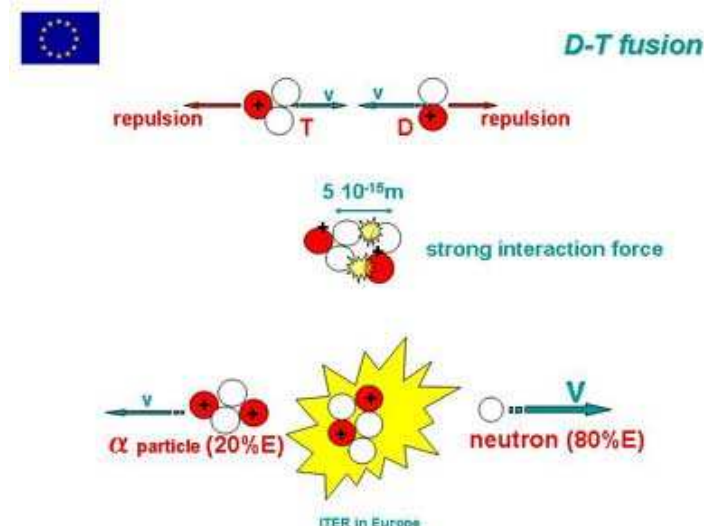
Il est donc essentiel de commencer à réfléchir à de nouvelles sources d'énergie, et l'une des solutions envisagée est la fusion nucléaire. C'est la raison pour laquelle les grandes puissances économiques mondiales, ont décidé le lancement d'un immense programme de recherche, dont le but sera à terme de maîtriser ces réactions de fusion nucléaire et surtout d'être capable de s'en servir pour produire de l'électricité. Ce projet international a été baptisé ITER : Réacteur expérimental thermonucléaire international.

I) Source d'énergie du futur : maîtriser la fusion nucléaire ?

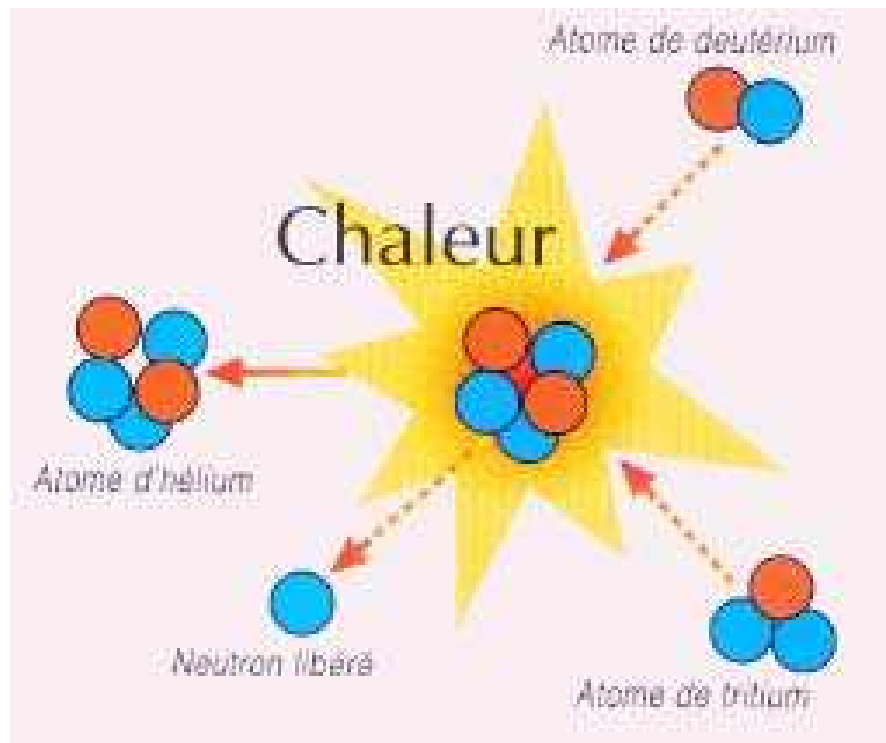
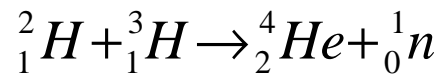
A) Les réactions de fusion nucléaire dans les étoiles comme le Soleil.

La fusion est la source d'énergie du Soleil et des autres étoiles. Une étoile commence à briller quand la matière en son cœur atteint, sous l'effet des forces de gravitation, des densités et des températures suffisantes pour déclencher des réactions thermonucléaires libérant de l'énergie (chaleur et rayonnement). Dans ces conditions de température et de pression, on dit que la matière est sous forme de plasma (gaz ionisé très chaud qui constitue un nouvel état de la matière). La tendance du plasma à se disperser et donc à se refroidir (ce qui provoque l'arrêt des réactions de fusion) est contrebalancée par la force gravitationnelle, qui permet le confinement du plasma au cœur de l'étoile. On parle alors de confinement gravitationnel.

Pour permettre la réalisation d'une réaction de fusion, il faut approcher suffisamment deux noyaux qui, puisqu'ils sont chargés tous les deux positivement, vont naturellement se repousser. Une certaine énergie est donc indispensable pour franchir cette barrière et arriver dans la zone très proche du noyau, où se manifestent des forces nucléaires capables de l'emporter sur la répulsion électrostatique.



La réaction nucléaire la plus accessible est la réaction impliquant le deutérium et le tritium (isotopes de l'hydrogène). C'est sur cette réaction que se concentrent les recherches concernant la fusion contrôlée.



B) Réaliser la fusion sur Terre :

Sur Terre le confinement gravitationnel est impossible. Aujourd'hui, deux voies sont étudiées pour reproduire sur Terre des réactions de fusion :

- porter à très haute pression et à haute température un petit volume de matière pendant un temps extrêmement court. On cherche ainsi à obtenir le plus grand nombre possible de réactions de fusion, avant que le plasma ne se disperse. On parle alors de **confinement inertiel**.
- Piéger et maintenir à très haute température un plasma. Ce plasma est confiné dans une boîte immatérielle de forme torique (tokamak*) créée par des champs magnétiques. On parle alors de **confinement magnétique**.

C'est la voie du confinement magnétique qui a été choisie pour le projet ITER.

**tokamak : (contraction des mots russes, toroidalnaya, kamera, magnitnaya) : appareil contenant un plasma confiné dans un espace restreint à l'aide d'un très fort champ magnétique toroïdal, permettant d'étudier les réactions de fusion.*

II) Le projet ITER :

ITER a pour but de démontrer la faisabilité scientifique et technique de l'énergie produite par la fusion des atomes. C'est-à-dire qu'au sein d'un réacteur de type tokamak, un mélange de deutérium et de tritium (isotopes de l'hydrogène) peut-être porté à température de

l'ordre de 200 millions de degrés, suffisante pour que la réaction de fusion s'auto-entretienne et qu'elle soit contrôlée.

A) Historique et calendrier :

La naissance du projet ITER remonte à novembre 1985, lors du sommet de Genève où Mikhaïl Gorbatchev a proposé de réaliser un programme interne pour construire la prochaine génération de tokamak.

En octobre 1986, les Etats-Unis, l'Europe et le Japon répondent favorablement à cette proposition. Le projet ITER est lancé, et regroupe sous les auspices de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA) quatre participants : les USA, le Japon, la Russie et l'Europe (à laquelle est associée le Canada).

La première phase d'étude est lancée en 1988 et s'achève en 1990. Démarre ensuite la première phase de l'ingénierie détaillée qui s'achève en 1998, et qui voit le retrait des USA du projet pour des raisons internes. Les trois autres partenaires décident alors d'orienter leurs efforts vers la conception d'installations moins coûteuses ayant des objectifs réduits. La phase d'ingénierie détaillée de cette nouvelle version s'achève en juillet 2001.

En Janvier 2003, les Etats-Unis et la Chine rejoignent le projet, suivis de la Corée du Sud en juin.

Le 28 Juin 2005, tous les membres réunis à Moscou décident le site de Cadarache en France comme le site de construction du réacteur.

Initialement quatre sites de construction ont été proposés :

- Cadarache en France
- Clarington, dans l'Ontario au Canada
- Rokkasho-Mura, au Japon
- Vandellós en Espagne.

La phase de construction est prévue pour commencer fin 2006 ou début 2007 et durer 8 à 10 ans.

La phase d'exploitation devrait commencer en 2015 et durer au minimum 20 ans. Après cela, si la validation complète d'ITER est réalisée, la conception d'un autre réacteur expérimental de puissance équivalente à un réacteur industriel sera lancée, destinée à étudier la possibilité d'une exploitation commerciale, après quoi les premiers réacteurs d'application pourront être fabriqués, sans doute pas avant 50 ans.



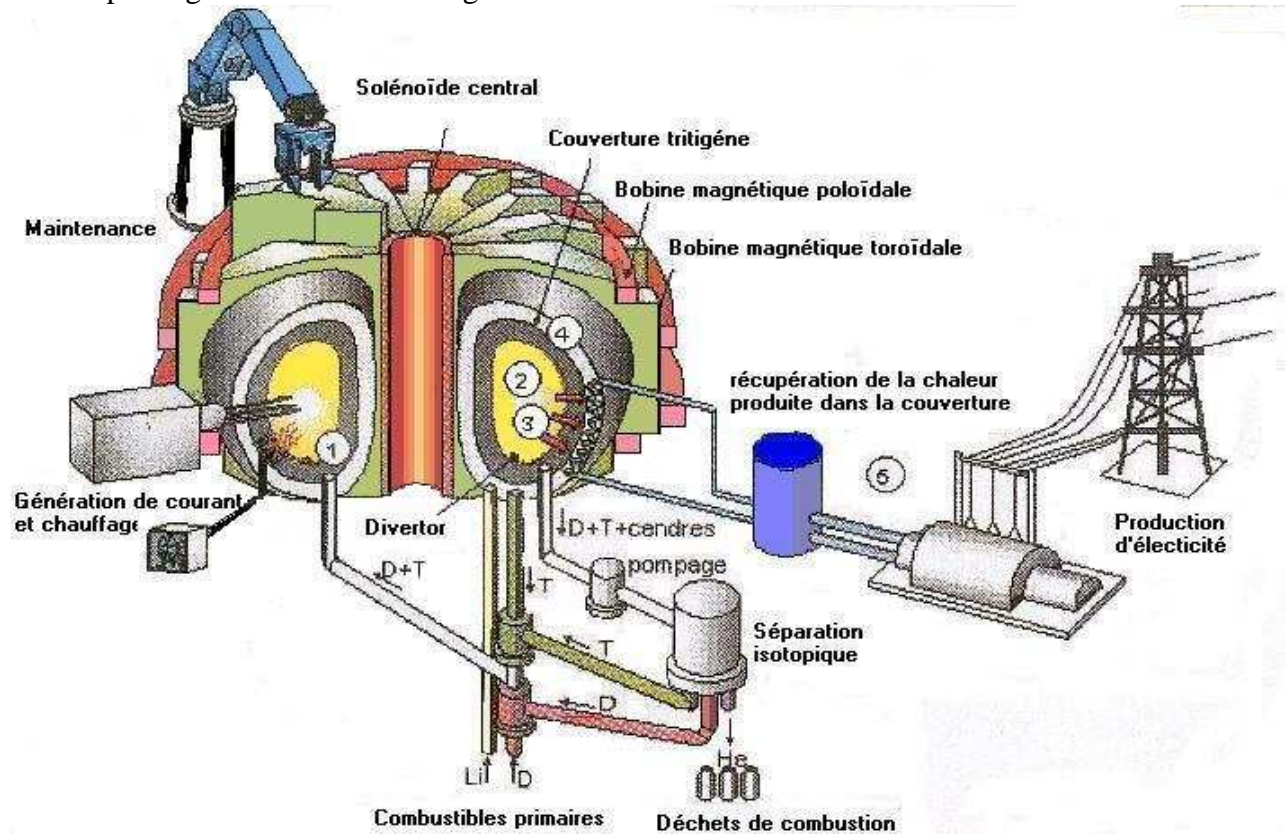
B) Principe de fonctionnement :

Le mélange combustible deutérium-tritium est injecté dans une chambre où grâce à un système de confinement magnétique, il passe à l'état de plasma qui chauffé par injections d'ondes électromagnétiques va brûler. Ce faisant, le réacteur produit des atomes d'hélium et de l'énergie sous forme de particules rapides et de rayonnement. L'énergie produite sous forme de rayonnement s'absorbe dans un composant particulier appelé « **la première paroi** », qui comme son nom l'indique est le premier élément matériel rencontré au delà du plasma.

L'énergie cinétique des neutrons est, quant à elle, convertie en chaleur dans la couverture tritigène, élément au-delà de la première paroi, mais néanmoins à l'intérieur de la chambre à vide. La chambre à vide est le composant qui clôt l'espace où a lieu la réaction de fusion.

La première paroi et la chambre à vide (deuxième paroi) sont refroidies par un système d'extraction de la chaleur (circulation d'eau). La chaleur est utilisée pour produire de la vapeur et alimenter un ensemble turbine et alternateur producteur d'électricité.

Dans le cas d'ITER, machine expérimentale, la chaleur dégagée est évacuée dans l'atmosphère grâce à des tours de refroidissement.



C) JET et Tore Supra, précurseurs d'ITER :

Le JET (Tore commun européen) est le plus grand tokamak existant aujourd'hui, situé au *Culham Science Center* près d'Oxford en Angleterre. Sa construction débuta en 1979, et il produit son premier plasma en 1983. D'une très grande taille, mais construite avec des technologies simples, JET a permis de montrer la faisabilité des réactions de fusions nucléaires sur des temps courts, permettant la production d'énergie électrique. En 1996, le JET établit un record dans le domaine de la fusion nucléaire en produisant une puissance de 16MW pendant une seconde.

Pendant un réacteur dont la durée de fonctionnement n'est que d'une seconde, n'est pas un réacteur très attrayant pour produire de l'énergie. C'est la raison pour laquelle fut décidé la construction d'un nouveau tokamak, de plus petite taille et moins puissant que JET mais utilisant cette fois des technologies novatrices (aimants supraconducteurs, boucliers thermiques) permettant de réaliser des plasmas de longue durée. C'est ainsi que fut construit TORE SUPRA (dérivé de *Tore* et *Supraconducteur*) à Cadarache, qui établira à son tour un record, mais cette fois-ci dans la durée de fonctionnement d'un tokamak, en maintenant un plasma pendant 6 minutes et 30 secondes.

L'objectif d'ITER sera de combiner ces deux résultats (puissance et durée de fonctionnement) en les améliorant considérablement afin de montrer la faisabilité d'un futur réacteur industriel de fusion nucléaire.

D) Buts et objectifs fixés :

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

- générer une puissance de base de 500 mégawatts durant plus de 6 minutes tout en n'en injectant que 50.
- Démontrer que les réactions de fusion dans le plasma peuvent être maintenues en continu pendant plus de 16 minutes. (dans ce cas pour 50 MW fournis, seuls 250 MW seront produits).

Ces objectifs seront réalisables grâce à la maîtrise de technologies de pointe mobilisant des dizaines de laboratoires, de chercheurs et ingénieurs du monde entier.

Le record mondial est à ce jour, de 6 minutes et 30 secondes, réalisé par le Tokamak français Tore Supra.

E) ITER en chiffres :

	TORE SUPRA (Cadarache)	JET (Culham, Angleterre)	ITER (Cadarache)
Puissance de fusion	-	16 MW	500 MW
Volume du plasma	30 m ³	100 m ³	840 m ³
Grand rayon du plasma	2,40 m	3 m	6,20 m
Petit rayon du plasma	0,72 m	1,25 m	2 m
Hauteur du plasma	1,4 m	4,2 m	6,80 m
Durée de maintien des plasmas	6 minutes	≤1 minute	De 6 minutes à 16 minutes

ITER à Cadarache en chiffres

- Un site de 180 hectares
- 500 emplois directs devraient être créés pendant la phase de construction
- 1 000 emplois directs pour l'exploitation (chercheurs, ingénieurs, techniciens, personnel administratif)
- Financement total du projet : 4,7 milliards d'euros pour la construction (10 ans) et 4,8 milliards d'euros pour l'exploitation (20 ans)
- Tokamak d'un volume de plasma d'environ 840 m³
- 500 MW de puissance de fusion sur des durées de 400 secondes

L'impact d'ITER pour l'emploi et l'économie

Phase de construction (2005-2015) : 4,7 G€

Equipements d'infrastructure et adaptation du site
Composants de haute technologie
Etudes d'ingénierie

Contribution régionale : 447 M€

Total :
500 personnes directement employées par ITER,
3000 emplois indirects en France dont 1400 en région PACA

Montant des dépenses induites localement pendant les 10 ans de construction par l'arrivée de populations nouvelles : 100 M€ par an.

Phase d'exploitation (2015-2035) : 4,8G€ auquel il faut ajouter 500 M€ pour le démantèlement

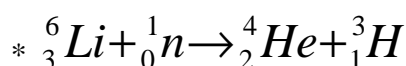
- Environ 1000 personnes employées directement par ITER, dont :
 - 600 personnes pour l'exploitation et
 - 400 scientifiques (dont 2/3 d'étrangers)
- 3250 emplois indirects en France, dont 2400 en région PACA

Montant annuel des dépenses : 165 M€ en France, dont 135M€ en région PACA, pendant les 20 ans de l'exploitation.

III) ITER projet économiquement viable ?

A) Avantages de la fusion nucléaire :

Le premier avantage de la fusion nucléaire est l'**abondance du combustible**. En effet, le deutérium est un élément qui peut-être extrait de l'eau (par distillation, électrolyse ou échange isotopique) et ses réserves correspondent à plusieurs millions d'années de consommation mondiale. Quand au tritium, élément radioactif à vie courte, il est obtenu à partir du lithium* qui est un élément stable que l'on trouve en abondance dans les océans et dans la croûte terrestre.



Le deuxième avantage est que tout comme les réacteurs actuels à fission nucléaire, un réacteur à fusion nucléaire **n'émet pas, durant son fonctionnement, de gaz à effet de serre.**

Un autre avantage concerne aussi **la sécurité du fonctionnement du réacteur.** En effet, la fusion se fait au sein d'un réacteur dont les principes de fonctionnement excluent tout emballement pour deux raisons :

- la quantité de combustible présent à tout moment au sein du réacteur est très faible (de l'ordre de quelques grammes) et correspond à quelques dizaines de secondes de combustion.
- La moindre perturbation au sein du réacteur (comme une coupure d'alimentation) entraîne un refroidissement du plasma et un arrêt spontané de la fusion.

Le dernier avantage de la fusion nucléaire est que comparé à la fission, **les déchets de nature radioactive sont plus limités.** En effet, la fusion produit de l'Hélium, un gaz non radioactif et chimiquement inerte. Par contre les déchets seront principalement constitués de déchets technologiques, constitués par les matériaux entourant le plasma. Matériaux qui seront rendus radioactifs par le bombardement des neutrons générés par les réactions de fusion. 90% des déchets radioactifs générés par l'exploitation, puis le démantèlement de l'installation, seront des déchets de très faible, faible où moyenne activité.

B) Inconvénients et problèmes à résoudre :

Le projet ITER soulève actuellement de nombreuses critiques, aussi bien de la part d'associations écologiques que dans le monde scientifique. En effet, le coût exorbitant du projet (au dépend d'autres axes de recherche pour la maîtrise de la fusion) associé à de nombreux défis technologiques qui restent encore à relever, laissent perplexes de nombreux scientifiques.

Un sérieux problème se pose pour la conservation du plasma qui a tendance à se polluer et à refroidir ce qui provoquera l'étouffement de la chaudière. Pour le moment, les réactions de fusion n'ont pu être maintenues que quelques secondes. Le but d'ITER est d'en réaliser pendant plusieurs minutes. Mais personne n'a pour le moment prévu de négocier ce problème d'extinction de la chaudière sauf en invoquant « le facteur d'échelle ». Les pertes radiatives étant d'autant plus faibles que la machine est grosse, si on obtient x minutes de fusion dans ITER il suffira alors de construire un « Super ITER » beaucoup plus gros donc beaucoup plus coûteux.

Un autre problème consiste en la réalisation des parois du tokamak. Il se pose encore aujourd'hui le problème posé par les neutrons rapides que l'on ne sait pas manipuler aujourd'hui. De plus beaucoup de scientifiques mettent en doute la capacité des bobinages supraconducteurs utilisés pour le confinement magnétique du plasma qui sont extraordinairement fragiles et incapables de résister à des flux de neutrons rapides comparables à une bombe H pendant toute la durée de vie d'un tel réacteur (10 à 20 ans), ce qui imposerait des remplacements prématurés et produirait une quantité beaucoup plus importante de déchets.

Beaucoup de scientifiques (dont certains sont pourtant favorables à l'énergie nucléaire) estiment donc que la construction d'ITER est prématurée alors que des « verrous technologiques » n'ont pas encore été levés. Le physicien Sébastien Balibar de l'Ecole Normale Supérieure résume bien la situation actuelle : « *On nous annonce que l'on va mettre le Soleil en boîte. La formule est jolie. Le problème c'est que l'on ne sait pas fabriquer la boîte.* »

Des écologistes émettent aussi des doutes quand au véritable but recherché par ITER. Certains affirment que le projet ITER ne serait qu'un moyen de financer indirectement l'industrie nucléaire et qu'il serait une bonne affaire pour les militaires car il garantirait la présence permanente de 2 kg de tritium avec un flux annuel de 1,2kg, soit de quoi alimenter

plusieurs centaines de têtes nucléaires dopées au tritium. De plus cette production de tritium ferait aussi courir un risque de prolifération d'armes nucléaires. Cependant, la relative facilité de posséder une bombe A, et le peu d'intérêt stratégique à posséder une bombe H (beaucoup plus complexe à mettre en œuvre) relativise ce risque.

Enfin si le tritium est un élément radioactif de période courte, il est cependant très dangereux du fait que libéré accidentellement il s'insinue partout, ce qui crée un risque d'accident de travail non négligeable.

CONCLUSION :

Le projet ITER se veut donc très ambitieux. Car si sur le papier, il représente la solution aux futurs problèmes énergétiques mondiaux, la mise en œuvre d'un tel réacteur à l'échelle industrielle suppose de résoudre préalablement trois problèmes de taille que nous avons évoqué précédemment :

- La maîtrise des réactions de fusion, particulièrement d'une réaction auto-entretenue.
- La production massive de tritium.
- L'invention d'un matériau résistant aux flux de neutrons (produit par la fusion) pour les enceintes de confinement.

Le tokamak d'ITER aura pour but de s'attaquer au premier problème. Le projet inclut aussi l'installation de *International Fusion Materials Irradiation Facility* pour l'étude de la résistance des matériaux aux neutrons de 14 MeV.

On peut donc aujourd'hui se demander si un tel investissement pour un projet qui n'aboutira peut-être jamais est judicieux. Surtout qu'il se fait au détriment de nombreux projets visant les énergies renouvelables ou de programmes d'économies d'énergie. Cependant l'histoire nous a souvent prouvé que les grandes découvertes se font parfois au prix d'une grande prise de risque.