

La fusion thermonucléaire contrôlée, ça se mange ?

écrit par Professeur Tetenlair | 31 juillet 2022



Préambule :

À la demande de notre fidèle ami patriote FONZY, votre serviteur consacre ce modeste article à la fusion thermonucléaire contrôlée. Comme vous vous en doutez, ce sujet n'attire pas les foules. Alors, votre serviteur n'y emploie aucune formule chimique, ni mathématique. Il n'en reste pas moins que les choses ne sont, quand même, pas très intuitives.

Si tu n'es pas un fou de la fusion thermonucléaire contrôlée, et que tu ne souhaites pas faire exploser ton crâne, zap cet article et retrouve ta rubrique préférée pour le prochain article : la planète naine Pluton. Ce sera plus romantique...

Pour faire simple, on peut dire que les étoiles naissent, vivent, et meurent en fonction de l'énergie de fusion thermonucléaire qu'elles présentent. Par exemple, l'énergie de notre Soleil (une étoile comme les autres) émet de la lumière qui nous parvient sur Terre (en 8 mn 20 s) par diffusion, absorption et réémission. Cette lumière est vitale car elle est responsable de la photosynthèse (besoins vitaux des plantes), responsable des bactéries, ces deux éléments constituant la quasi-totalité de la vie sur terre se sont.

Alors, avant d'aller plus loin, quelques petites précisions pour ne pas faire de confusion.

1) les termes de "**fusion nucléaire**" et "**fusion thermonucléaire**" signifient la même chose. Le terme de fusion est employé car le phénomène consiste en une réunion de deux noyaux atomiques (de l'atome) à caractère léger pour former ainsi un seul noyau mais qui sera plus lourd et donc plus stable. Cependant, ce dernier noyau obtenu aura une masse inférieure à la somme des deux noyaux atomiques et la différence sera une production d'énergie sous forme de photon, à savoir de lumière.

2) le terme de "**fission nucléaire**" constitue le phénomène inverse du précédent, c'est-à-dire que d'un atome lourd on obtient deux atomes plus légers avec, également, production

d'énergie. Lorsqu'il s'agit des atomes d'uranium, leur fission est le principe du fonctionnement des centrales nucléaires (fission > chaleur > eau en vapeur > mise en marche turbine > alternateur > électricité).

Nous nous en tiendrons ici que sur le **1)**, soit l'objet de l'article. Alors quel est le problème de la fusion thermonucléaire contrôlée ?

- qu'est-ce que c'est ?
- peut-on la reproduire sur Terre, et si oui pourquoi faire, en avons-nous besoin
- que faut-il pour la reproduire ?

Pour répondre à toutes ces questions, comme d'habitude, l'Homme s'appuie sur ce que lui donne la nature : les exemples et les moyens. Comme, en fait, nous souhaitons ni plus ni moins reproduire ce qui se passe dans les étoiles, les scientifiques copient les leçons de notre Soleil, notre étoile la plus proche.

Pour avoir ses réactions thermonucléaires, le Soleil impose ses trois conditions :

1. il a besoin d'hydrogène (présent à environ 74 % de la masse des étoiles) et de deutérium
2. une croissance de leur occurrence ou « section efficace » avec l'augmentation de la température. Ainsi, quand les premières réactions de fusion ont lieu à une température donnée, elles réchauffent le milieu et font croître la température. Les réactions deviennent alors plus nombreuses, accélérant la montée en température, et ainsi de suite, jusqu'à une valeur d'équilibre très élevée.
3. pour chauffer efficacement la région centrale du Soleil, l'énergie thermonucléaire dégagée ne doit pas s'en évader trop vite. Cette énergie est produite principalement sous forme de rayonnement X dont le

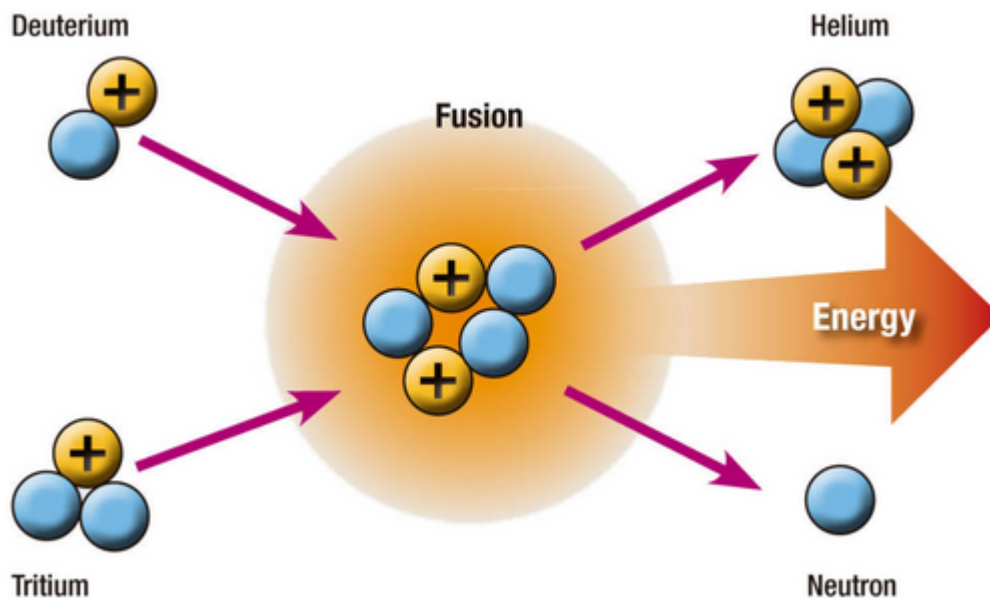
transfert vers l'extérieur est freiné par l'opacité du Soleil due aux éléments atomiques bien plus lourds que l'hydrogène, malgré leur concentration infime.

Seulement, voilà. Le processus de fusion nucléaire ne peut avoir lieu que dans des conditions de température et de pression particulières. Au cœur de notre Soleil, la pression est égale à 200 milliards de fois la pression atmosphérique terrestre et la température centrale atteint environ 15 millions de degrés. Dans ces conditions, les noyaux légers d'hydrogène (75% de la composition du Soleil) fusionnent en noyaux d'hélium (24%) approximativement deux fois plus lourds, créant ainsi la lumière et la chaleur que nous recevons. Selon les calculs, 620 millions de tonnes d'hydrogène y sont transformés en 615,7 millions de tonnes d'hélium chaque seconde. Ce n'est pas rien, ami ?

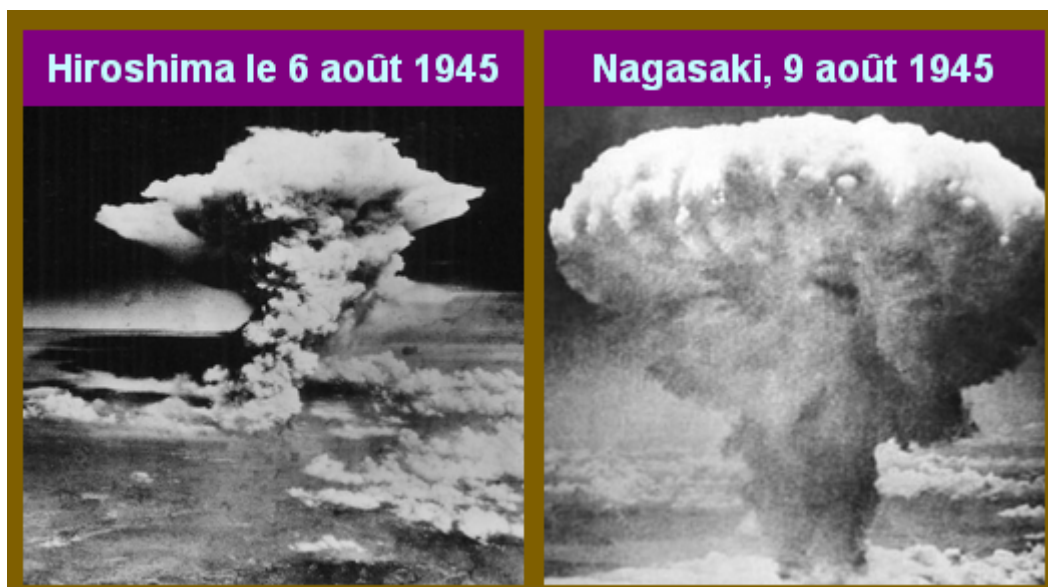
Alors, le rêve humain serait de reproduire, et surtout maîtriser de façon stable et contrôlée cette fusion thermonucléaire, ce qui produirait une énergie quasi inépuisable et quasiment propre. Il était donc tentant d'essayer de produire d'abord en laboratoire, puis dans le futur, à une échelle industrielle, des réactions thermonucléaires.

Un tel effort a été entrepris depuis les années 1950 aux États-Unis, en Russie, au Japon et dans plusieurs pays de l'Union européenne, notamment en Allemagne, en France, en Italie et au Royaume-Uni.

Cependant, pour des raisons de propriétés chimiques et réactives, sur Terre, une telle fusion thermonucléaire ne pourrait se faire qu'à partir de deux isotopes (= molécule ayant les mêmes propriétés qu'une autre, mais différente par le nombre de neutrons contenu dans son noyau) de l'hydrogène : le **deutérium** et le **tritium**.



Revenons maintenant sur Terre. La fission fut découverte à la fin de 1938, et, courant 1939, la possibilité d'une réaction en chaîne fut confirmée par la mesure de deux ou trois neutrons produits par la réaction de fission. Les hommes ont testé deux actions nucléaires en situation réelles, toutes deux à partir de la bombe A qui est une bombe à fission nucléaire. Ce sont les deux bombes envoyées sur Hiroshima et Nagasaki en août 1945.

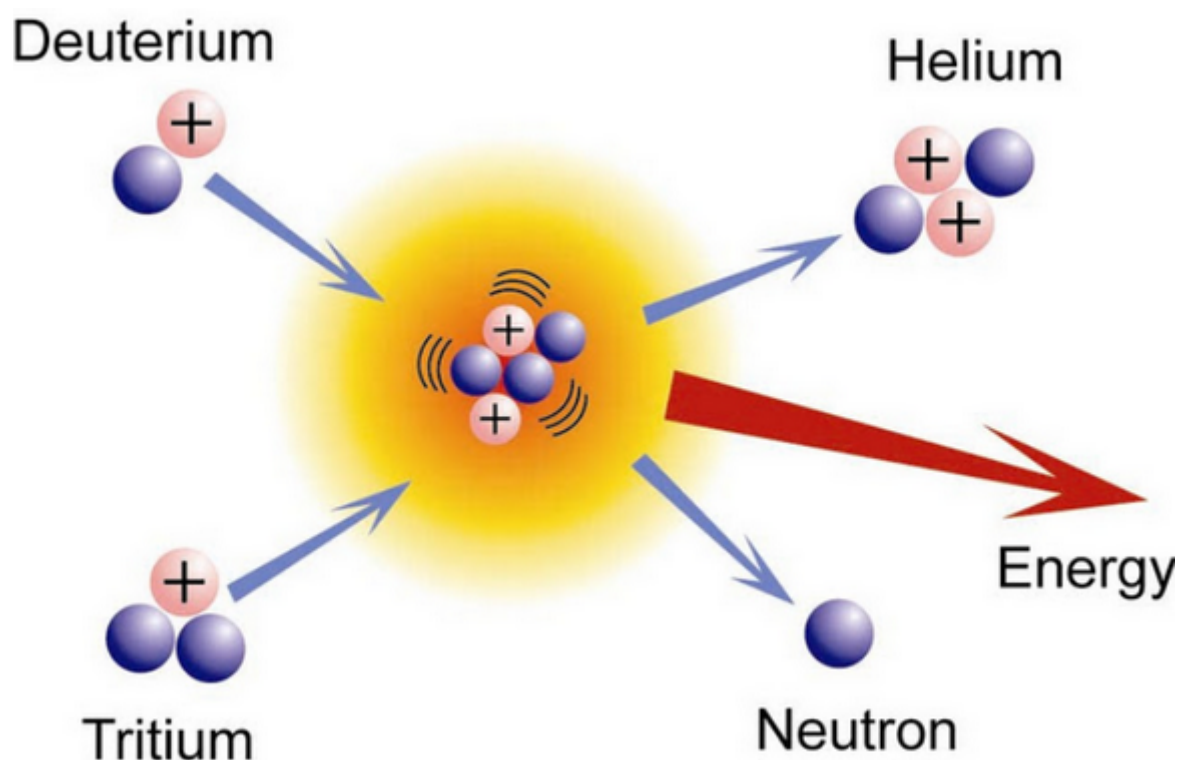


La fusion thermonucléaire est étudiée en laboratoire depuis le début des années 1950, la faisabilité scientifique d'un réacteur n'est toujours pas démontrée. D'où vient donc, ami passionné, cette différence entre le rythme rapide de la

fission et celui, plus lent, de la fusion contrôlée ?

C'est que les phénomènes de base des réacteurs à fission – la diffusion des neutrons, leur capture par les noyaux atomiques et la fission de ces noyaux par les neutrons – sont des phénomènes qui varient linéairement avec la densité du nombre des neutrons. Les études à très basse puissance (quelques watts), permettent donc de déduire, par simple multiplication, les phénomènes intervenant dans les réacteurs de puissance produisant des milliards de watts ; en particulier, il n'y a pas besoin d'étudier la neutronique des puissances intermédiaires, ni celle de niveau le plus élevé.

Au contraire, les phénomènes advenant dans un réacteur de fusion ne sont pas linéaires. Au fur et à mesure que les machines utilisées pour les études de fusion augmentèrent en puissance, on observa de nouveaux phénomènes (les mathématiciens parlent de bifurcations) qu'il faut comprendre, modéliser et contrôler, le niveau nominal final pouvant encore être source de nouveautés. De plus, avec les concepts actuels, des niveaux de puissance très élevés seront vraisemblablement nécessaires pour démontrer la faisabilité de la fusion.



Seulement voilà, ami, c'est que pour amorcer cette fusion thermonucléaire il faut que le mélange soit porté à très haute température entre 100 et 200 millions de degrés. Alors pour en arriver là, dès 1950 on a défini deux méthodes :

A) la première est appelée *confinement magnétique* et consiste à maintenir en régime stationnaire le mélange gazeux deutérium-tritium dans lequel les ions sont confinées pendant environ une seconde par un champ magnétique puissant (pour les curieux d'une mesure de 3 à 8 teslas). Cette méthode est partagée par de nombreux pays et pour la mettre en pratique on a construit de très grands appareils appelés **tokamak**.



Pour cette bestiole de tokamak, il en existe grosso modo deux types : les doriques et les sphériques. La photo ci-dessus est celle d'un tokamak torique. Ci-dessous la photo d'un tokamak sphériques.



Comment cela fonctionne-t-il ?

On crée une configuration magnétique bien définie dans un volume utile délimité de forme toroïdale (voir photo ci-dessus) et dans laquelle toute pollution extérieure est éliminée. On obtient une pression résiduelle inférieure à 10^{-6} pascal. Puis on la remplit d'hydrogène-deutérium et tritium dans le réacteur. Après une ionisation en cascade on atteint en quelques millisecondes une ionisation totale qui permettra de transporter un courant important. On a ainsi réalisé la configuration magnétique tokamak par la création d'un plasma.

Plasma d'un tokamak



Après, il faut chauffer puissamment le résultat obtenu à plusieurs kiloélectronvolts (un électronvolt est égal à l'énergie cinétique acquise par un électron lorsque, partant une position de repos, il atteint une différence de potentiel d'un volt). Il existe pour les plus connus trois méthodes de chauffage :

- le *chauffage ohmique* : c'est une méthode simple et efficace mais qui a très vite ses limites. Par une résistivité proportionnelle à la température des électrons, plus le placement est chaud, moins le chauffage est efficace. Ainsi cette méthode de chauffage ne peut atteindre au maximum qu'une température de 2 à 3 kiloélectronvolts au lieu des 10 à 20 kiloélectronvolts nécessaire pour la fusion. Alors, les scientifiques ont trouvé deux autres méthodes de chauffage pour compléter le chauffage ohmique.

- le chauffage par *injection de neutres rapides* en injectant des ions de même nature que ceux du plasma mais d'énergie bien

supérieure. La collision provoquée ainsi provoque une source d'énergie

– le chauffage par *onde à haute fréquence* : après avoir créé une onde électromagnétique, elle est envoyée dans le plasma au moyen d'antennes placées au niveau de la paroi à l'intérieur de la chambre contenant le plasma. Chaque antenne permet aujourd'hui de transmettre chacune 10 MW.

Il existe aussi le confinement inertiel à l'aide de lasers.

Le savais-tu ?



Le plasma est considéré comme le 4^e état de la matière après les états liquide, solide et gazeux. Quand on arrive à de très hautes températures, les constituants de l'atome se séparent, noyaux et électrons se déplacent indépendamment et forment un mélange globalement neutre : c'est un plasma.

Ce quatrième état de la matière, que l'on retrouve dans les étoiles et le milieu interstellaire, constitue la majorité de notre univers (autour de 99%). Sur Terre, on ne le rencontre pas si ce n'est dans les éclairs ou les aurores boréales.

On le produit toutefois artificiellement en appliquant des champs électriques suffisamment puissants pour séparer le noyau de ses électrons dans les gaz. Exemples d'applications : écrans plats des téléviseurs ou tubes à néons éclairants.



LE PROJET I.T.E.R.

Un projet, une machine hors du temps...

Un million d'éléments, dix millions de pièces... le tokamak ITER sera la plus grande et la plus puissante des machines de fusion jamais construites. Conçue pour amplifier d'un facteur dix la puissance qui aura été apportée à ses systèmes de chauffage (50 MW → 500 MW) elle sera la première à générer une production nette d'énergie, par la chaleur.

Le but est de fournir une installation de fusion capable de produire une quantité d'énergie nette, c'est-à-dire qu'elle en fournira plus qu'elle en aura besoin elle-même pour fonctionner.

Le 28 juin 2005, à Moscou, au terme de longs mois de négociations, l'Union européenne, le Japon, la Russie, les États-Unis, la Chine et la Corée du Sud décidaient d'implanter le réacteur de recherche I.T.E.R. à Cadarache, au nord-est d'Aix-en-Provence. Aujourd'hui, participent à ce projet les 27 membres de l'Union européenne + (par Euratom) la Suisse et le Royaume-Uni + la Chine, l'Inde, le Japon, la Corée, la Russie, et les États-Unis.

Au centre de la parcelle de 180 hectares trône la plateforme ITER (42 hectares), où des travaux sont actuellement en cours pour construire les bâtiments scientifiques du programme ITER. Photo: ITER Organization/EJF Riche, mai 2021



POURQUOI I.T.E.R.

La quantité d'énergie de fusion qu'un tokamak peut produire dépend du nombre de réactions de fusion qui se produisent en son cœur. Plus l'enceinte est grande (et donc également le volume de plasma) plus grand sera le potentiel de production d'énergie de fusion.

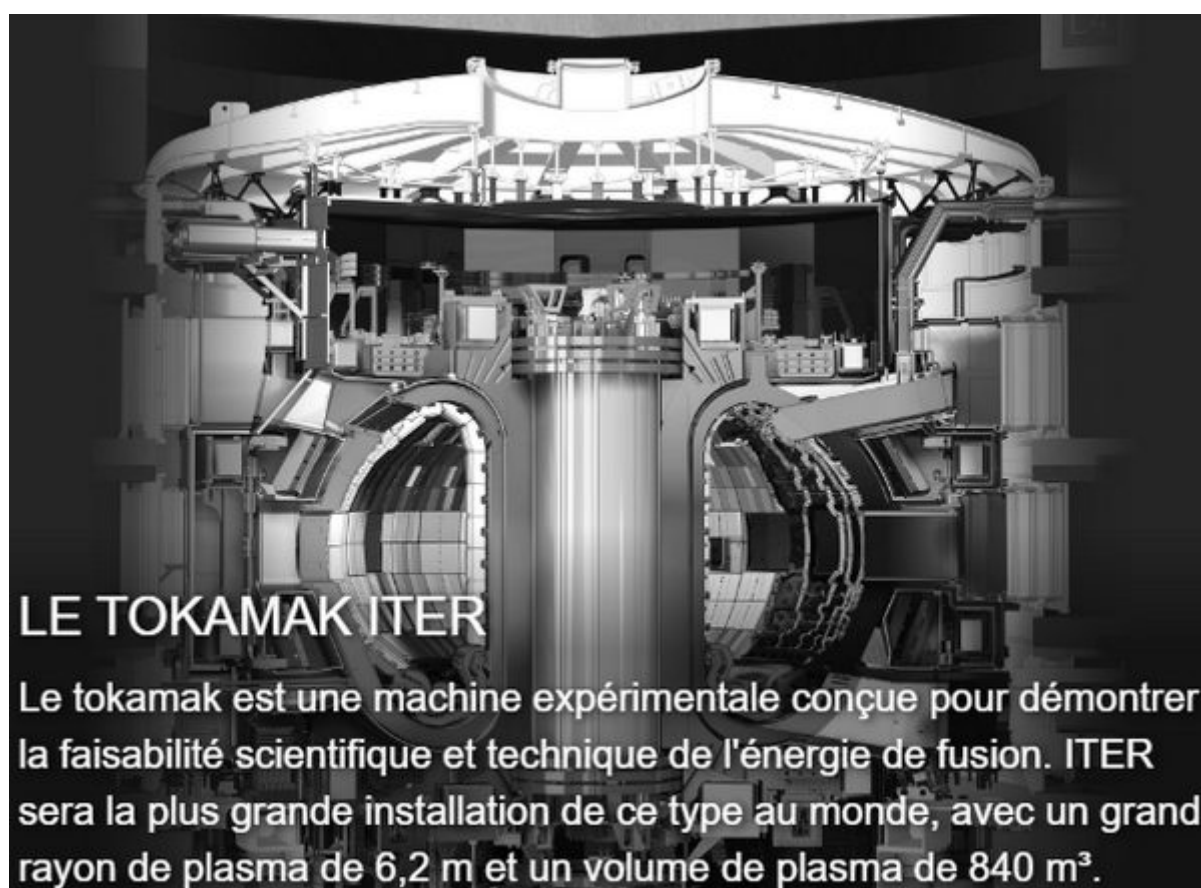
Avec un volume de plasma **dix fois supérieur à celui de la plus grande machine de fusion opérationnelle aujourd'hui**, le tokamak ITER sera un outil expérimental unique, capable de générer des plasmas de longue durée. Ne l'oublions pas, pour une fusion, la masse des noyaux finaux est légèrement plus faible que celle des noyaux initiaux. Ce défaut de masse (m), multiplié par le carré de la vitesse de la lumière (c), est responsable de l'énergie libérée (E), selon la célèbre formule d'Einstein $E = mc^2$.

Mais les noyaux ayant tendance à se repousser à cause de leur

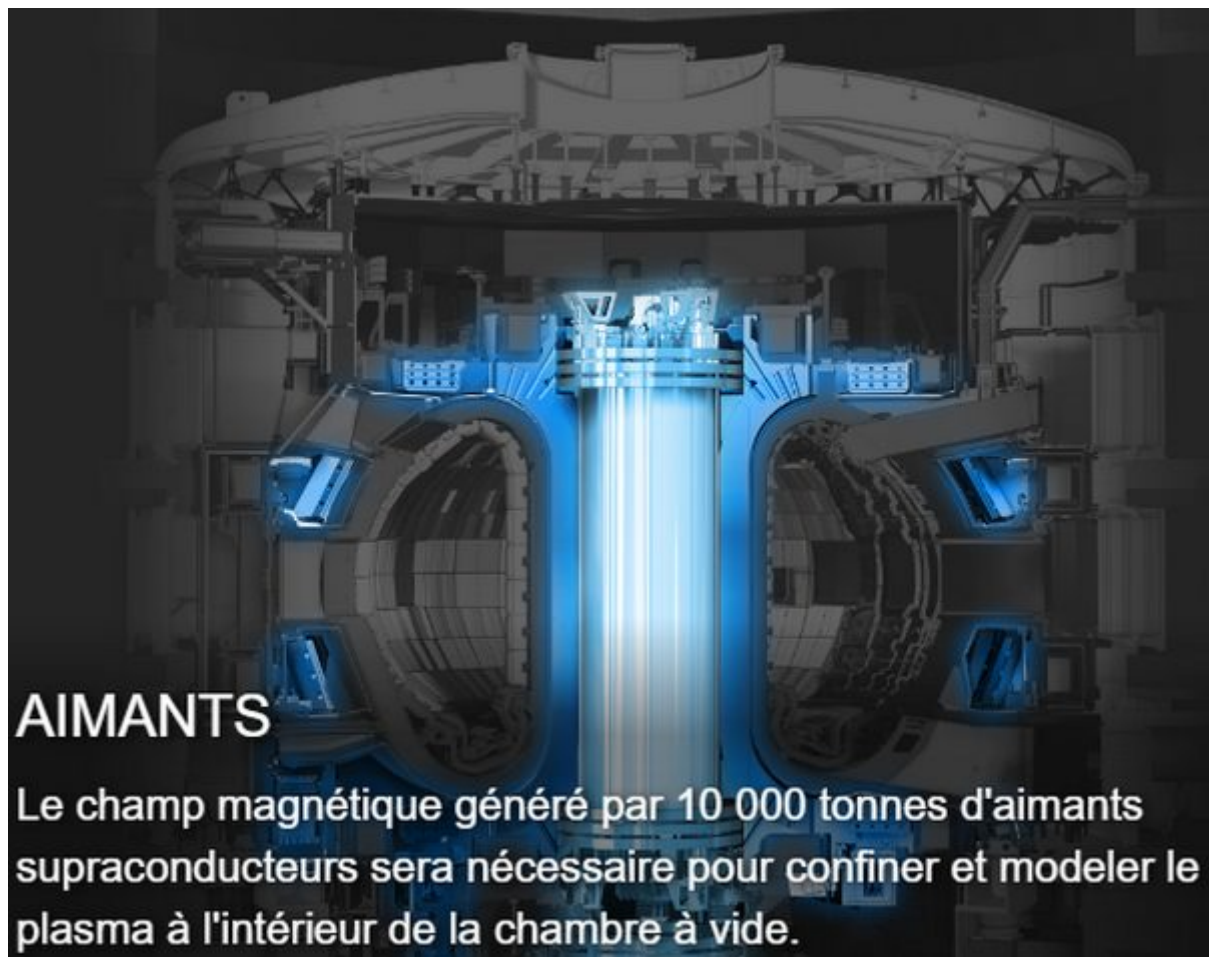
charge électrique, il faut leur communiquer une grande vitesse relative pour qu'ils puissent ainsi fusionner. Ces conditions sont remplies en portant un gaz suffisamment dense à de très grandes températures (plus d'une dizaine de millions de degrés). Il devient alors un plasma, état largement répandu dans l'Univers puisqu'il représente plus de 99,9 p. 100 de la matière visible. I.T.E.R. est conçu pour isoler thermiquement ce plasma en le piégeant dans un champ magnétique intense de forme torique (tokamak).

Ce projet en cours de réalisation, I.T.E.R., est prévu pour fournir son premier plasma au mois de décembre 2025. Les premières constructions ont commencé en 2010.

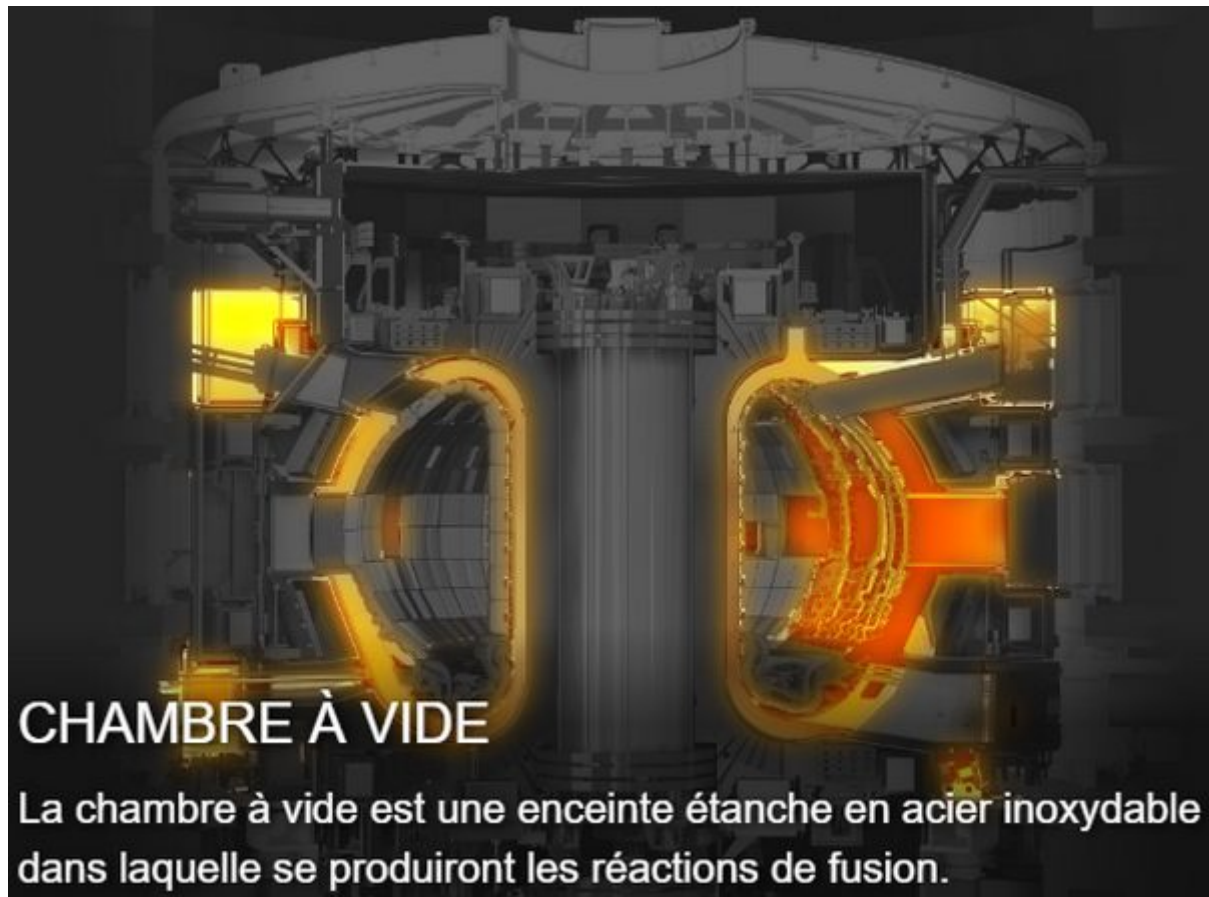
Ci-dessous, quelques illustrations explicatives.



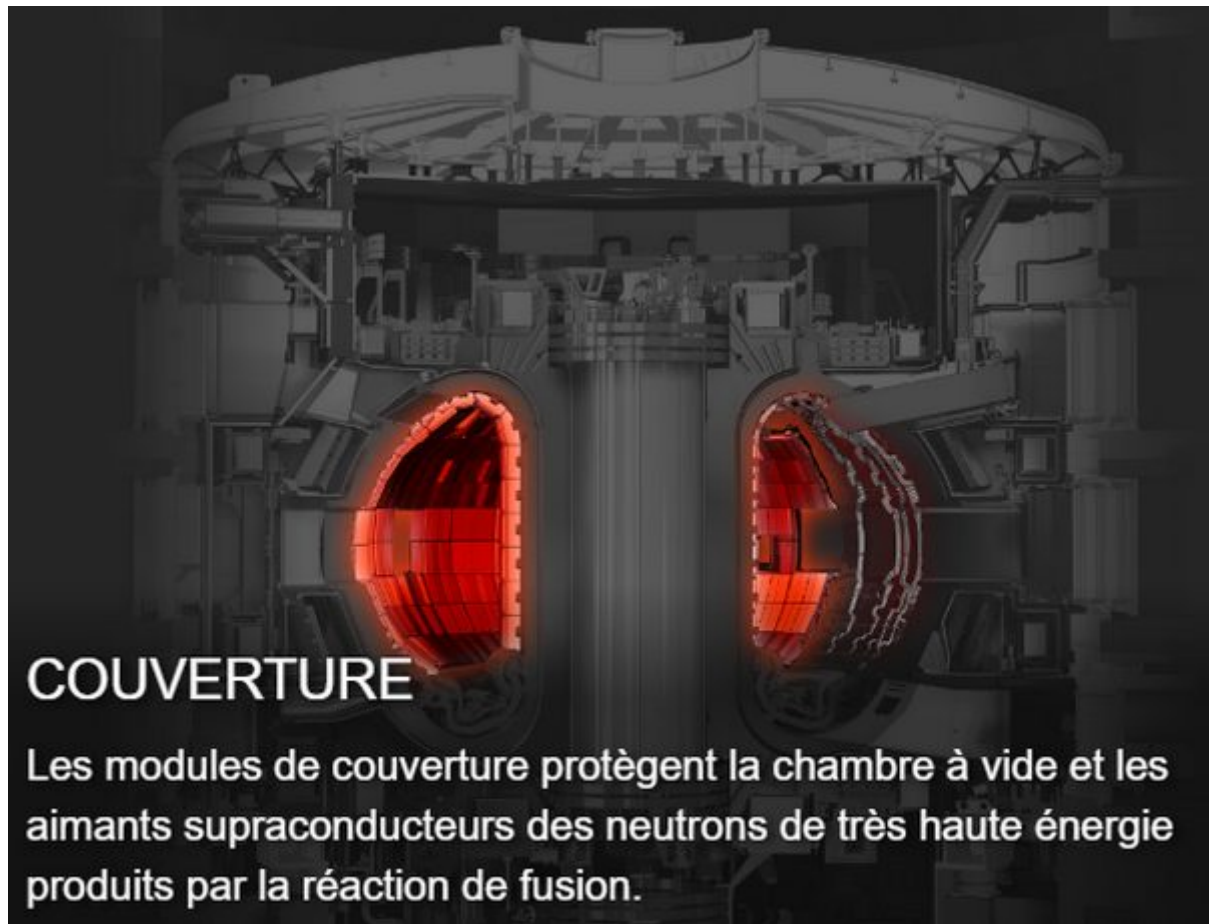
A rajouter un poids de 23 000 tonnes, une température (chaleur) du plasma 10 fois supérieure à celle régnante au cœur du Soleil, et un objectif de 500 MW. I.T.E.R ne produira pas d'électricité mais de la chaleur.



A rajouter : 51 GJ d'énergie stockée, température des aimants plus froide que la planète naine Pluton (-269°C).



A rajouter, la chambre à vide pèse à elle seule 8 000 tonnes (plus lourde que la Tour Eiffel), le plus grand volume de plasma avec 840 m^3 , un rayon record de 6m (6,2 m pour le plasma).



A rajouter un bouclier protecteur constitué de 440 modules de couverture, première couverture activement refroidie, surface de couverture de 600 m².

A detailed 3D cutaway diagram of a tokamak divertor assembly. The diagram shows the complex internal structure, including the central column, the divertor target area at the bottom, and the surrounding vacuum chamber. The divertor is highlighted with blue glowing elements, indicating its role in extracting heat and impurities. The overall structure is symmetrical and highly engineered.

DIVERTOR

Le divertor, qui se trouve sur le « plancher » de la chambre à vide, assure l'extraction des effluents gazeux et des impuretés de la machine, et doit être capable de supporter des charges thermiques de surface très élevées.

A rajouter la structure modulaire du divertor est constituée de 54 cassettes chacune d'entre elle pesant 10 tonnes.



A rajouter le vide du cryostat est 1 million de fois moins dense que l'atmosphère terrestre, et il est constitué de 3 800 tonnes d'acier, et constitue la plus grande enceinte à vide en inox au monde avec un volume de 16 000 m³.

Et pour faire fonctionner tout cela, il y a 10 systèmes annexes ultra sophistiqués.

LE PROJET H.I.P.E.R.

(High Power Laser Energy Research) en français : Projet Laser haute puissance)

IMPORTANT !

Le projet HIPER ci-dessous décrit a été "lancé" en 2006 sur le papier et la phase préparatoire a été lancée en avril 2008.

A l'heure actuelle il est impossible de savoir si ce projet

existe toujours, si des installations ont commencé d'être construites.

Aucune source que j'ai consultées (et elles sont nombreuses) ne donnent de nouvelles ou non de l'existence concrète de ce projet HIPER.

C'est pourquoi, ce qui suit relate les projets conçus en avril 2008 et années suivantes sans garantie d'existence.

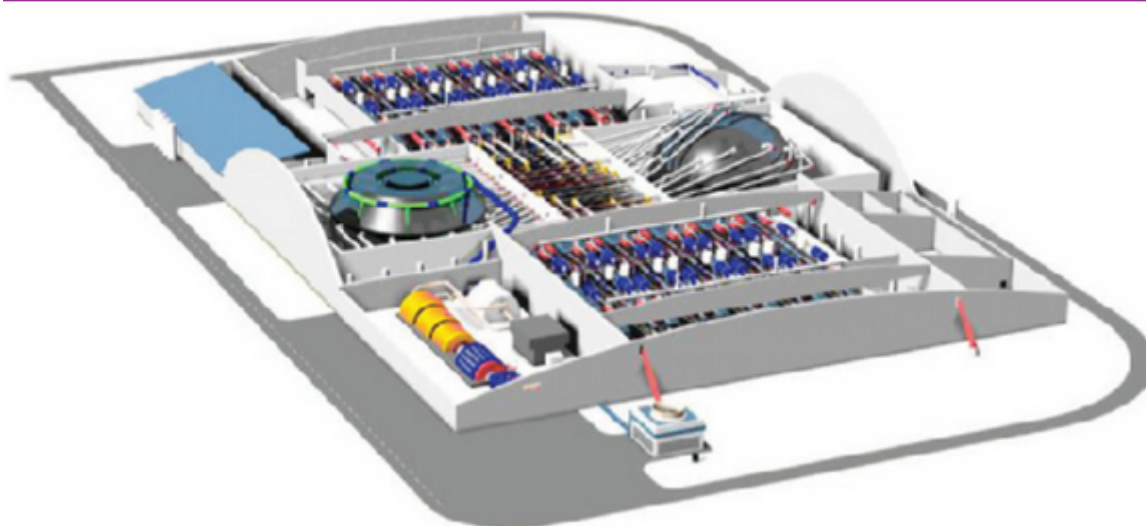
HIPER est une installation laser multinationale conçue pour permettre à l'Europe de prendre une position de leader dans la poursuite de l'énergie de fusion inertielle, tout en offrant une capacité internationale unique pour la science dans des conditions extrêmes.

Le projet HIPER (European High Power Laser Energy Research Facility (Preparatory Phase Study)), financé par l'UE, a été lancé dans le but de concevoir un laser à grande échelle qui sera utilisé pour activer la production d'énergie à partir de la fusion inertielle . Il constitue également une base importante pour la science des interactions laser à haute puissance.

Appelé fusion inertielle, le processus a été démontré dans les années 1970 en utilisant des lasers pour provoquer l'implosion d'une capsule de combustible et libérer de l'énergie. Par la suite, d'importants efforts de recherche ont été consacrés au développement de lasers permettant d'exploiter l'énergie libérée par ces capsules.

Avec la dernière génération de lasers développée par le National Ignition Facility aux États-Unis, les chercheurs ont franchi les premières étapes vers la maîtrise de la fusion inertielle. Ils ont fait la démonstration d'une réaction de fusion auto-entretenue qui libère plus d'énergie à partir de la capsule que ce qui est fournie par le laser.

Vue d'artiste du projet HIPER.



Même si une utilisation pratique n'est pas prévue pour les prochaines années, HIPER a établi des bases solides pour répondre aux demandes de sources d'énergie sans carbone, abondantes et sûres. Ce nouveau concept de fusion par laser ouvre la voie à des avancées cruciales pour développer une technologie à l'échelle d'une centrale électrique. En d'autres termes, HIPER n'est pas une centrale électrique à fusion par laser, mais l'une des dernières étapes vers sa construction. Comme il s'agira du laser le plus puissant au monde, cette installation bénéficiera également à la science fondamentale car elle permettra d'effectuer sur la matière des mesures de précision qui ne sont actuellement pas possibles.

Plus de précisions, issus de [ce site](#).

HIPER (en anglais : « High Power Laser Energy Research », en français : « Projet Laser haute puissance », est un projet de réacteur thermo-nucléaire international, expérimental et différent du projet ITER.

Selon les auteurs du projet, il a aussi pour objectif d'offrir aux chercheurs la possibilité de tester des matériaux, des réactions physiques et de nouveaux types de turbulences en conditions extrêmes (conditions qui ne pourraient être réunies sur terre, hormis au moment et au lieu d'initiation de

l'explosion d'une bombe atomique).

HiPER devrait permettre d'observer et tester le comportement de la matière exposée à des dizaines de millions de degrés de température, des pressions de milliards d'atmosphères, et des champs magnétiques un milliard de fois plus importants que ceux éprouvés sur Terre ; conditions évoquant les débuts de l'univers ou certains phénomènes se produisant dans les supernovae.

Le budget initial de recherche proposé par les promoteurs de ce projet est de 600 millions €, soit bien moins que celui d'ITER (mais en utilisant certaines infrastructures et laboratoires déjà coûteusement financés par ailleurs)

Le projet

Principe scientifiques et techniques, et caractéristiques annoncées

Fusion par confinement inertiel et activation laser ;

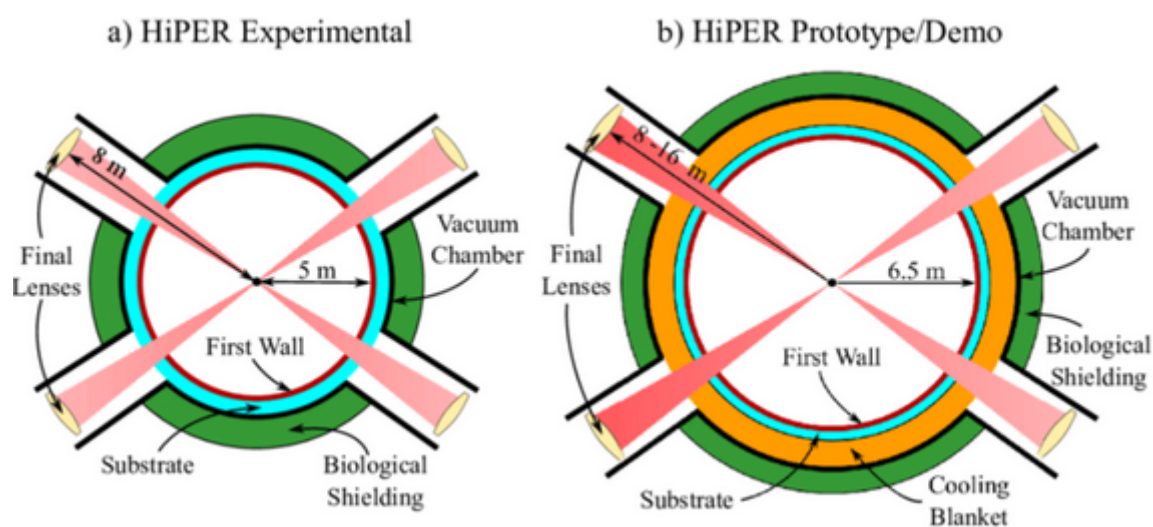
1. Compression par laser d'une capsule
2. Préparation
3. Activation (laser haute puissance)
4. Fusion et production d'énergie

L'enjeu est de récupérer, grâce à deux technologies d'origine militaire (laser haute-puissance et confinement inertiel) l'énergie de réaction de fusion thermonucléaire, et non comme dans le projet ITER dans un champ magnétique intense visant à confiner un plasma composé de noyaux de deutérium et de tritium.

Le principe est conceptuellement semblable à celui du moteur à explosion, avec une phase de compression du carburant et une phase d'allumage, mais sans le rôle du piston et avec des énergies bien plus importantes.

Les acteurs du projet HIPER devront mettre au point et tester

un système de lasers en séries, capables de viser et atteindre l'enveloppe de capsules de deutérium et de tritium injectées dans le cœur du réacteur au rythme d'environ 600 par minutes. Selon eux, un processus de production d'énergie par fusion inertielle a déjà été démontré sur Terre dans un spin-out d'un programme de défense aux États-Unis. Un programme de démonstration utilisant un laser ultra-puissant devait être prévu dans la période de 2010 à 2012 (sur le National Ignition Facility aux États-Unis).



Principe : L'enveloppe de ces capsules devrait imploser sous l'effet des lasers en comprimant fortement et brutalement leur contenu, lequel ensuite irradié par une impulsion laser à haute puissance (température d'environ 100 millions de degrés Celsius, comme dans le soleil ou une explosion nucléaire, durant un centième de milliardième de seconde devrait s'entamer une réaction de fusion thermonucléaire libérant des neutrons à haute énergie (selon les travaux publiés en 2001 par des chercheurs japonais). Reste à maîtriser et convertir l'énergie de ces neutrons en électricité, probablement via le principe classique de chauffage d'eau pour produire de la vapeur alimentant une turbine et des alternateurs.

Phase d'étude, de conception et de coordination

Une phase de 3 ans était prévue pour produire les technologies permettant à des lasers de viser et atteindre une dizaine de

capsules par seconde injectées dans la chambre de fusion.

Si une solution est trouvée, une phase plus détaillée du projet pourrait ensuite être initiée.

Choix du site de construction du prototype

Avant la construction d'un réacteur, il sera nécessaire de tester les systèmes laser, ce qui aurait dû se faire en France, en Aquitaine, avec le laser Mégajoule à haute-énergie « PETAL » (pour « PETawatt Aquitaine Laser »).

La puissance des lasers qui doivent initier la fusion des capsules injectées dans le réacteur ne s'exprime que par impulsion ultra-brèves (quelques millions de millièmes de seconde), mais nécessite d'importantes précautions ; en effet, chaque impulsion demande une énergie comparable à environ dix mille fois la puissance totale distribuée par le réseau électrique national du Royaume-Uni.

Phase de construction et d'exploitation

Les promoteurs du projet reconnaissent que les espoirs de solution énergétique alternative suscités depuis 40 ans par la fusion, ont été plusieurs fois repoussés vers le futur. Ils n'annoncent d'ailleurs pas de réacteur commercialement exploitable à court ou moyen terme.

Professeur Têtenlair