

2021

Visite à Iter



Nolan Dias-Tomaszower

06/07/2021

Fission Fusion

Pour Einstein en 1905, un système au repos possède une énergie due à sa masse, appelée énergie de masse. Elle est définie par : $e = mc^2$

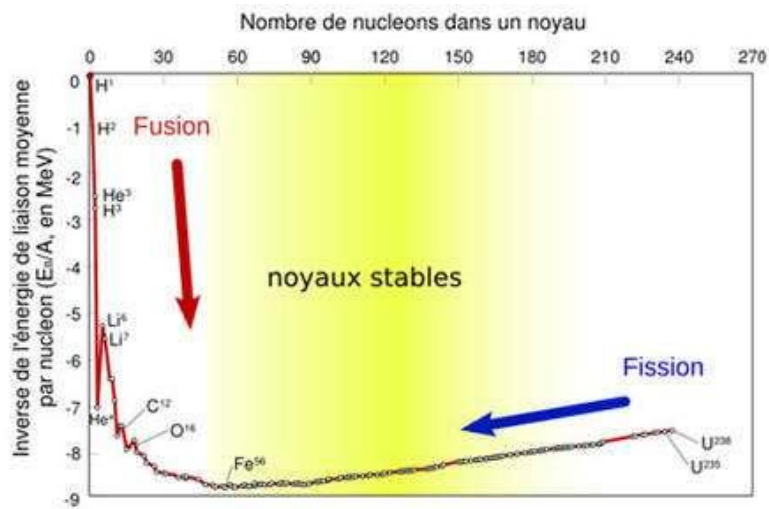
La relation d'Einstein implique que quand il y a diminution de la masse d'un système alors il y a libération d'énergie vers l'extérieur.

La masse d'un noyau est toujours inférieure à la somme des masses des nucléons qui le compose.

L'énergie de liaison correspond à l'énergie qu'il faut fournir à un noyau au repos pour le dissocier en nucléons isolés et immobiles.

La courbe d'Aston permet de comparer la stabilité des différents noyaux atomiques.

Que l'on réalise une réaction de fusion ou de fission les noyaux produits lors de la réaction seront plus stables que ceux mis en œuvre par déclencher la réaction.



Concernant le réacteur de fusion ITER, on va s'intéresser aux atomes légers Hydrogène, Hélium, Lithium, Béryllium car comme le montre la courbe de l'énergie de liaison, ce sont ceux qui produisent le plus d'énergie en fusionnant.

Ce qu'est un plasma :

C'est un état de la matière « ordinaire » (baryonique) au même titre que liquide solide gazeux.

Le plasma est un gaz dans lequel les noyaux des atomes ne sont plus liés avec leurs électrons. Il est composé d'un mélange de particules neutres de noyaux positifs et d'électrons négatifs.

C'est l'état le plus présent dans l'Univers.

En effet dans un système étoile –planètes, l'étoile représente 99,9 % de la masse du système.

Puisque le plasma est conducteur, si on le soumet à un champ magnétique on va pouvoir le guider.

On peut parler des nucléons (protons et neutrons) éventuellement dire qu'eux même sont composés de particules : les quarks ...

(Au-delà, la structure interne d'un nucléon est complexe bien que passionnante car il ne suffit pas de parler quarks pour en connaître la composition, mais de cela mon cher confrère nous pourrons reparler entre nous en évoquant les paires quark-antiquark et autres subtilités de la chromodynamique quantique qui permet de respecter la loi d'exclusion de Tonton Pauli et laisse cohabiter 2 quarks Up ou 2 Down par exemple).

Ionisation

On dit d'un gaz qu'il est ionisé si les atomes ont perdu ou gagné au moins 1 électron. Pour la réaction de fusion du plasma d'ITER on forme un gaz de cations de noyaux d'Hydrogène. Une des étapes de mise en œuvre du réacteur consiste à débarrasser les atomes d'Hydrogène de leur électron.

Le plasma d'ITER est conducteur car il a une charge électrique positive qui est celle des protons qui composent le noyau des atomes d'hydrogène.

A l'inverse ce serait un anion et la charge serait négative si l'atome avait gagné un ou plusieurs électrons.

(Rmq : anode et cathode pour une pile ça peut évoquer des choses ...)

Ce qu'est un isotope

Des atomes ou des ions sont des isotopes s'ils ont le même nombre de protons et donc le même numéro atomique dans le tableau de classification des éléments de Mendeleïev.

Les isotopes d'un élément ont les mêmes propriétés chimiques que l'élément mais diffèrent par leur propriétés physiques en particulier leur masse.

Plasma de Fusion ITER

On va utiliser les ions (donc les noyaux) de 2 isotopes de l'hydrogène le deutérium et le tritium.

Ce plasma est nommé D-T

Le Deutérium est un isotope stable de l'hydrogène (1 proton + 1 neutron) ; Il est présent en grande quantité dans la nature et s'obtient par distillation de l'eau (douce ou de mer).

(Rmq on peut rappeler la bataille de l'eau lourde D₂O car celle-ci devait intervenir comme « régulateur » des neutrons dans la bombe nuk allemande)

Le Tritium est un isotope radioactif de l'hydrogène (1 proton + 2 neutrons). Le stock de Tritium est limité, environ 20kg, il est un des produits issu de certains types de réacteurs à fission nucléaire. Il est possible d'en produire par l'interaction d'un neutron et d'un atome de lithium. C'est cette voie qui devra être explorée pendant l'exploitation du réacteur ITER

Chaleur et Température

Attention à ne pas confondre Chaleur et Température.

Exemple de la vie courante : un tube fluorescent contient un gaz néon ou argon excité par une décharge électrique, bien qu'au sein du tube la température du gaz atteigne 15 000 degrés, au toucher le tube est presque froid.

Ce paradoxe s'explique par la très faible densité du gaz contenu dans le tube fluorescent. Pour transmettre de la chaleur d'un milieu vers un autre, il faut de la densité et plus celle-ci est élevée, plus grande sera la quantité de chaleur transférée. Exemple d'un morceau de bois ou de fer exposé au soleil, le bois peu dense reste froid alors que le métal est brûlant.

Conditions de Fusion dans le Soleil

En surface la température du Soleil est de 6 000 degrés, cette température est celle qui donne sa couleur jaune à notre étoile.

Les réactions de fusion prennent naissance au cœur de notre étoile.

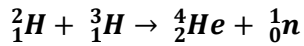
La température atteint **15 millions de degrés** centigrades et le milieu est d'une extrême densité en raison des forces de gravité qui s'exercent **densité 150 T/m³**.

Conditions de Fusion dans le réacteur ITER

Le plasma D-T dans ITER est un milieu très ténu, c'est un quasi vide. La chambre à vide de ITER contient au plus 1 gramme de plasma dans un volume de 840 m³ soit une densité de **0,001 g/m³** La température qui doit être atteinte pour déclencher la réaction fusion est en raison de la faible densité de **150 à 300 millions de degrés**

Réaction de Fusion D-T

Fusion Deutérium + Tritium fournit de l'énergie sous forme Hélium (particule alpha) et un neutron



Dans cette réaction il y a bien conservation du nombre des particules protons et neutron mais il y a une perte de masse.

	deutérium	tritium	hélium	neutron
Masse noyau (kg)	$3,34358 \cdot 10^{-27}$	$5,00736 \cdot 10^{-27}$	$6,64465 \cdot 10^{-27}$	$1,67492 \cdot 10^{-27}$

On trouve (masse produits – masse réactifs) = $-0,03137 \cdot 10^{-27}$ kg soit $-3,137 \cdot 10^{-29}$ kg

la relation masse énergie d'Einstein $E = mc^2$ permet de calculer l'énergie libérée par la perte de masse.

$$E = -3,137 \cdot 10^{-29} \cdot (3,00 \cdot 10^8)^2$$

Cette énergie libérée est de $2,82 \cdot 10^{-12}$ J

On peut exprimer cette énergie en MeV : 17,6 MeV

La part du noyau hélium est de 3,5 MeV

La part du neutron est de 14,1 MeV

On remarque que le neutron qui va transférer son énergie cinétique aux parois représente la grande part de l'énergie produite

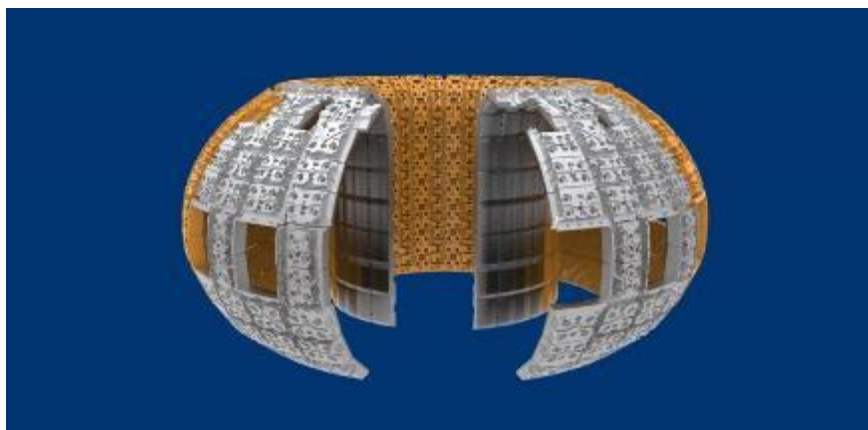
Production d'énergie dans le réacteur ITER

La réaction de fusion se produira dans un tokamak, une machine qui utilise des champs magnétiques pour confiner et contrôler le plasma chaud. La fusion du deutérium et du tritium (D-T) produira un noyau d'hélium, un neutron et de l'énergie.

Le noyau d'hélium est porteur d'une charge électrique. Il sera donc soumis aux champs magnétiques du tokamak et restera ainsi confiné dans le plasma. Toutefois, 80 % environ de l'énergie produite sera emportée hors du plasma par le neutron qui, n'étant pas chargé électriquement, demeurera insensible aux champs magnétiques. Les neutrons seront absorbés par les parois du tokamak, transférant leur énergie à ces dernières sous forme de chaleur.

Dans l'installation ITER, cette chaleur sera évacuée par des tours de refroidissement. Dans le prototype de réacteur de fusion (DEMO), qui succédera à ITER, ainsi que dans les futures installations industrielles de fusion, la chaleur sera utilisée pour produire de la vapeur et, au moyen de turbines et d'alternateurs, de l'électricité.

Dans un deuxième temps on remplacera des modules des parois qui sont positionnés face au plasma chaud par des modules dits « tritigènes ». Ces modules contiennent du Lithium et le bombardement de neutrons permettra de produire du Tritium



Puissance produite ratio Q

La quantité d'énergie de fusion d'un tokamak dépend du nombre de réactions produites, plus l'enceinte est grande, plus le potentiel de production est élevé.

Le volume de plasma d'ITER est 10 fois plus grand que celui du tokamak européen JET.

On désigne par Q le rapport entre l'énergie produite par les réactions de fusion et l'énergie consommée par la puissance de chauffage nécessaire pour entretenir la fusion.

A ce jour JET a généré 16 MW de puissance de fusion pour 24 MW de puissance de chauffage soit une valeur $Q = 0,64$

ITER cible de produire 500 MW de puissance de fusion pour une puissance de chauffage de 50 MW pendant 400 s soit une valeur $Q = 10$

Un des sujets majeur de la recherche est la réalisation d'un plasma D-T auto-entretenu.

Cette réaction dite « plasma en ignition » au sein duquel la chaleur de la réaction de fusion demeure confinée de manière suffisamment efficace pour entretenir une réaction de longue durée.

ITER sera la seule installation de fusion au monde capable de produire un plasma en combustion.

Chauffage du plasma

Pour obtenir 150 millions °C, il faut superposer trois méthodes.

- Le chauffage ohmique

Les variations des champs magnétiques utilisés pour confiner le plasma génèrent un effet de chauffage en créant un courant électrique de forte intensité qui excite les ions qui entrent en collision. Ces collisions créent une résistance qui produit à son tour de la chaleur mais ce chauffage n'est pas suffisant pour entretenir la réaction.

- L'injection de particules neutres à haute énergie

L'injection de neutres consiste à « tirer » des particules à haute énergie dans le plasma. À l'extérieur du tokamak, des particules de deutérium chargées sont accélérées jusqu'au niveau d'énergie nécessaire. Ces ions accélérés traversent ensuite un « neutralisateur de faisceaux d'ions » qui élimine leur charge électrique. Les particules neutres peuvent alors pénétrer à grande vitesse au cœur même du plasma au sein duquel, par le biais de collisions rapides, elles transfèrent leur énergie aux particules déjà présentes dans le plasma.

- Les ondes électromagnétiques

les ondes électromagnétiques à haute fréquence, sera intégrée à la conception du tokamak ITER pour faire monter la température jusqu'aux 150 millions de degrés Celsius requis.

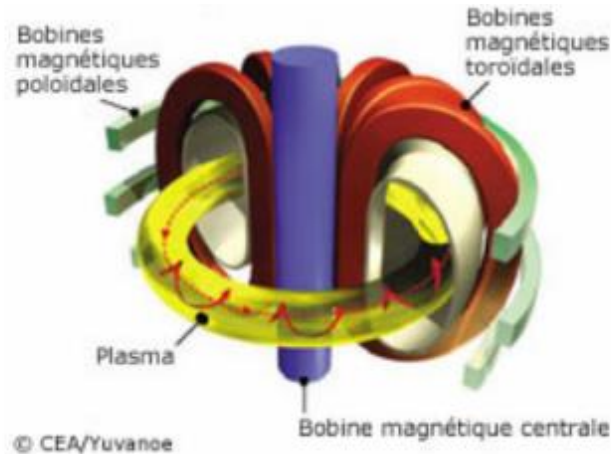
Comme les micro-ondes du four du même nom communiquent la chaleur aux aliments, l'énergie transportée par les ondes à haute fréquence qui pénètrent dans le plasma est transférée aux particules chargées. Elles accélèrent ainsi leurs mouvements chaotiques et augmentent leur température. Se fondant sur ce principe, ITER utilisera trois types d'ondes, correspondant chacune à une certaine fréquence des ions et des électrons du plasma, de manière à maximiser le transfert de chaleur.

Confinement du plasma

Dans le tokamak ITER, 10 000 tonnes de systèmes supraconducteurs (dont l'énergie magnétique totale est de 51 Gigajoules) généreront le champ magnétique qui créera, confina et modèlera le plasma.

Fabriqués en niobium-étain (Nb₃Sn) ou niobium-titane (Nb-Ti), les électroaimants deviennent supraconducteurs lorsqu'ils sont refroidis à moins de 270 °C (4K).

- Principe de fonctionnement d'un Tokamak

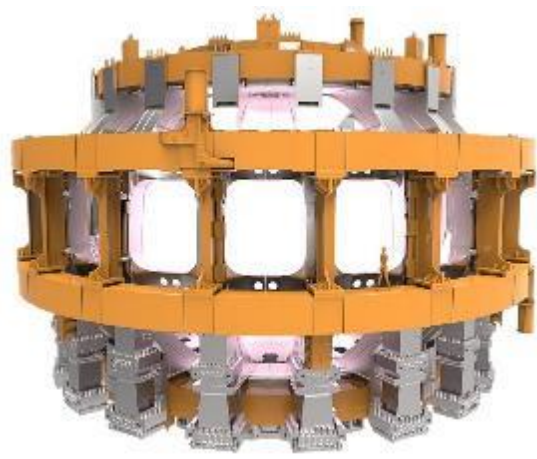
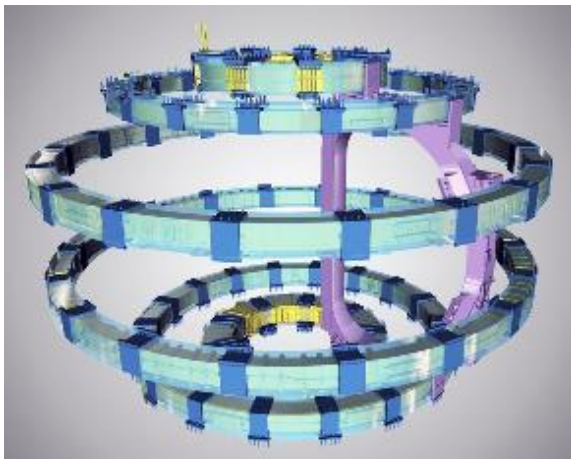


- Champ Poloïdal

Le système magnétique poloïdal (*poloidal field coils*) est constitué de six bobines horizontales, positionnées à l'extérieur de l'enceinte à vide et de la structure magnétique toroïdale.

Ces bobines assurent l'équilibre du plasma, qu'elles maintiennent à l'écart des parois en contrôlant de sa forme et de sa position dans la chambre à vide.

Le système poloïdal du tokamak ITER est conçu pour délivrer une énergie magnétique totale de 4 gigajoules et un champ magnétique maximum de 6 teslas.



- Champ Toroïdal

Les dix-huit bobines de champ toroïdal (*toroidal field coils*), positionnées verticalement autour de la chambre à vide, génèrent un champ magnétique dont la fonction première consiste à confiner le plasma. Les bobines de champ toroïdal sont conçues pour générer une énergie magnétique totale de 41 gigajoules et un champ magnétique maximum de 11,8 teslas. Hautes de 17 mètres et larges de 7, pesant chacune 360 tonnes les bobines de champ toroïdal sont les plus gros éléments de la machine après la chambre à vide



- Solénoïde Central

Le solénoïde central forme la « colonne vertébrale » de la machine. Sa fonction consiste à induire le courant plasma et à le maintenir tout au long de la décharge. Constitué de six bobines indépendantes à base de supraconducteur en niobium-étain, le solénoïde central est l'un des aimants supraconducteurs les plus complexes et les plus puissants jamais construits. D'un poids de 1 000 tonnes pour 13 mètres de haut (18 m de haut avec sa structure) et 4 mètres de large, il produira une énergie magnétique totale de 6.4 GJ et un champ magnétique maximum de 13 teslas, pour une intensité de courant de 15 MA pour des décharges de 300 à 500 secondes.



DEMO Fourniture d'électricité au réseau

Le retour d'expérience d'ITER permettra de concevoir un réacteur de démonstration (**DEMO**), qui portera la fusion au seuil de la phase industrielle.

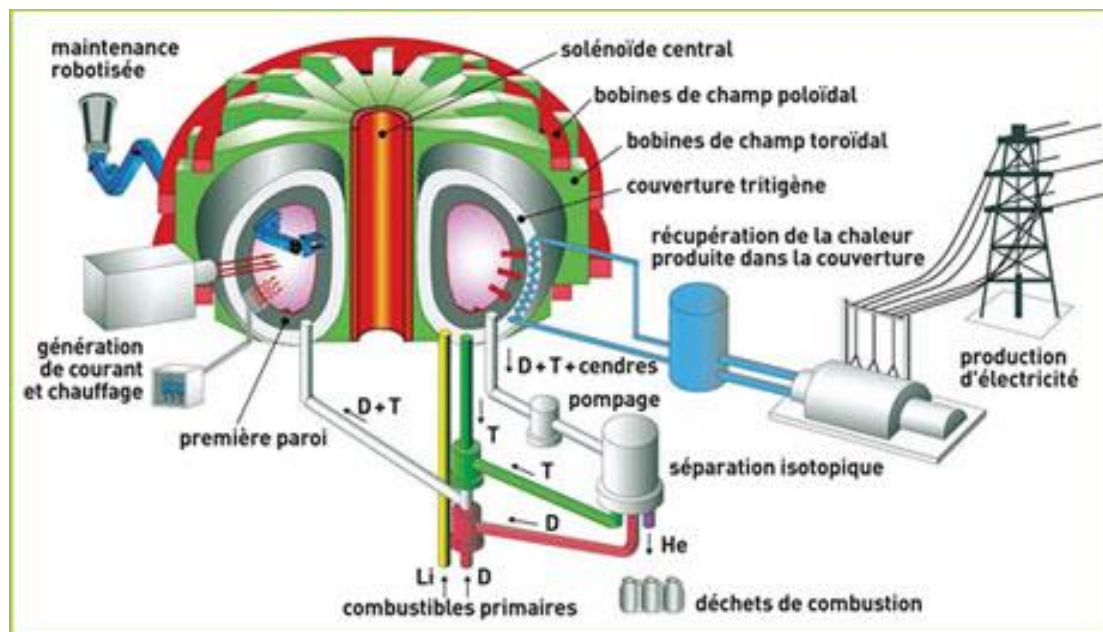
Les connaissances et le savoir-faire accumulé par l'exploration des plasmas de haute température dans le tokamak ITER seront mis à profit pour concevoir la machine qui permettra de tester le fonctionnement en régime continu tout en démontrant la capacité d'autosuffisance en tritium. Le terme DEMO décrit plus une phase qu'une machine. Différents projets DEMO, à l'étape conceptuelle, sont aujourd'hui étudiés par les membres d'ITER et il est trop tôt pour dire si DEMO sera le fruit d'une collaboration internationale comme ITER ou s'il procédera de choix nationaux.

Le travail conceptuel en cours, devrait se poursuivre tout au long des premières années d'exploitation de la machine ITER afin de tirer le meilleur parti du retour d'expérience. L'exploitation de ou des DEMO devrait commencer au début des années 2030 ; la commercialisation d'électricité issue de la fusion étant prévue à l'horizon 2040.

DEMO est l'installation qui, la première, fournira au réseau une électricité issue d'une machine de fusion. Les principaux objectifs de la phase DEMO sont l'extrapolation d'une exploitation continue ou quasi-continue (*steady state*), l'étude de systèmes de production d'énergie efficaces, l'obtention d'un rapport puissance injectée/puissance générée (« Q ») de 30 à 50 (par rapport à $Q \geq 10$ pour ITER) et la production de tritium au sein de l'enveloppe.

La conception du réacteur DEMO sera sans doute beaucoup plus simple que celle d'ITER : les systèmes de diagnostics seront beaucoup moins nombreux et la conception sera axée sur la production d'énergie plus que sur l'exploration des régimes de plasma.

Principe de fonctionnement



La visite en quelques chiffres

Masse de béton pour les installations 400 000 T

Masse du Tokamak 23 000 T

Quantité de matière injectée 2g

Nombre de composants du Tokamak 1 million

Refroidissement par le canal de la Durance

35 pays participants dont UE 27 pays, Russie, Inde, Corée du Sud, Chine, Etats-Unis

A ce jour 80% des bâtiments sont réalisés.

Finalisation prochaine de la salle de contrôle et du bâtiment d'injection des particules neutres

Coût actualisé 20 Milliards €. L'Union Européenne participe pour 45% du coût du projet.

Date de démarrage fin 2025 (peut être décalé en 2026 en raison crise sanitaire)

Fonctionnement avec injection du Tritium 2035. Ce qui sera la vraie expérience

Fin des opérations en 2040

Projet DEMO prévu pour 2045

Industrialisation en 2060

Des projets concurrents intégrant des électroaimants supraconducteurs ne nécessitant pas de cryogénie sont en cours de développement

La Chine prévoit un réacteur opérationnel dans un délai réduit



Bâtiment du Tokamak