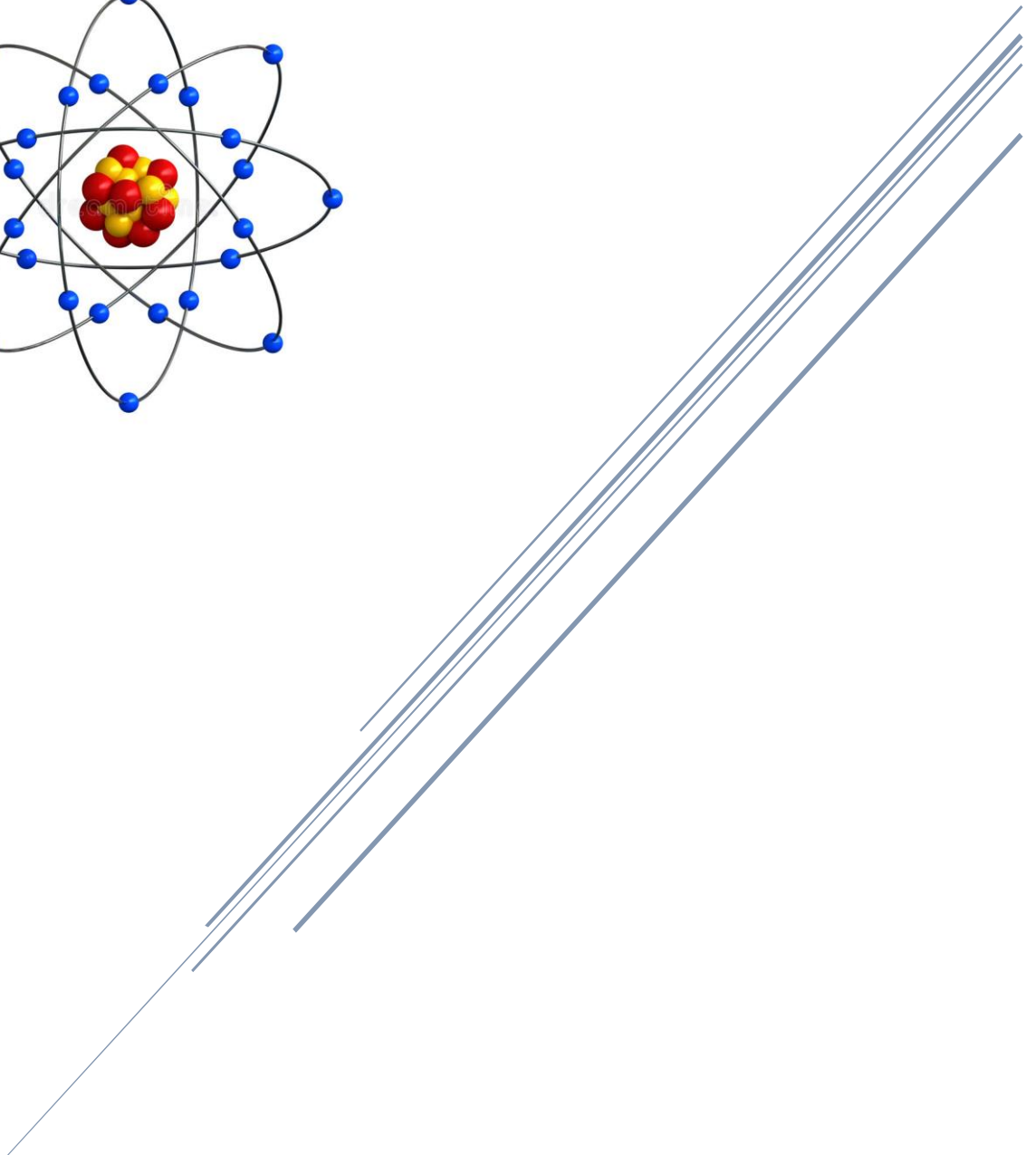
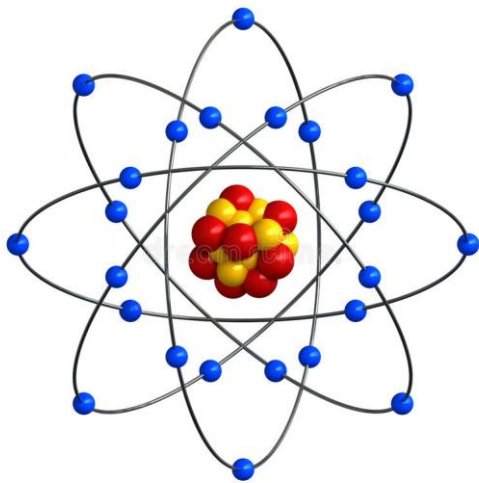


# LA FUSION NUCLÉAIRE

Travail personnel 2019-2020



Lycée Ermesinde Mersch  
Garel Thibault

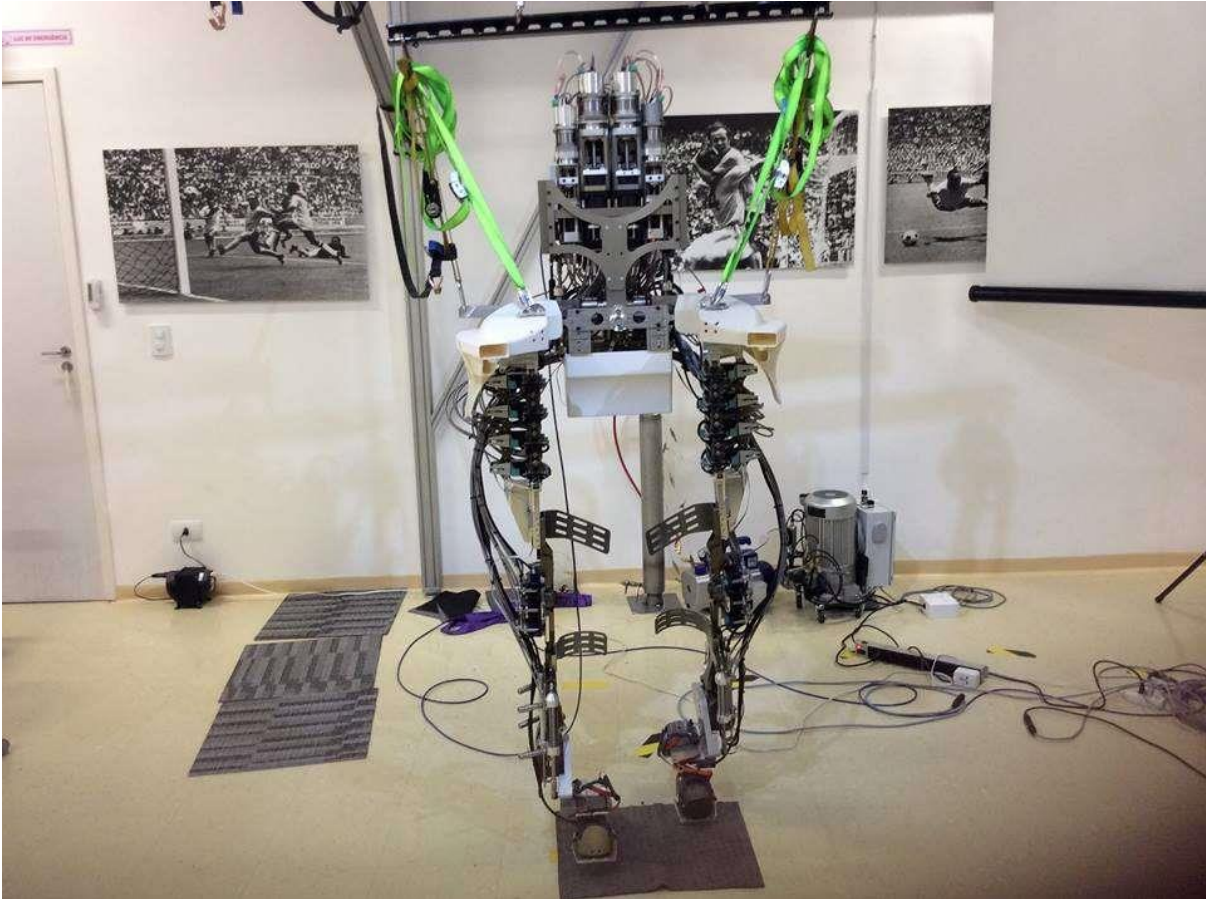
# Table des matières

Table des matières .....	1
Introduction.....	2
Instabilité des noyaux atomiques.....	3
Historique et formule .....	4
Les composants de la fusion.....	5
Conditions de fonctionnement.....	6
Qu'est-ce qu'un tokamak ? .....	6
Le plasma et son rôle.....	7
Comment obtenir un plasma à 150 millions de °C ? .....	8
Comment peut-on contenir le plasma ?.....	9
Le processus .....	9
Le problème des neutrons.....	10
Incertitude majeure.....	11
Le projet ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor).....	12
Le tokamak ITER et ses principaux composants.....	13
Après ITER.....	20
Confinement magnétique avec JT-60SA.....	21
La fusion par confinement inertiel laser.....	22
Synthèse .....	23
Conclusion .....	24
Annexes .....	25
Bibliographie.....	26
Lexique.....	27

## Introduction

Il y a deux ans, j'ai eu la chance de visiter l'Institut national de recherche en sciences et technologies du numérique (Inria) de Nancy. Là s'est développée une véritable passion en moi sur tout ce qui touche aux mathématiques et à la technologie. C'est pour cette raison que j'ai choisi ce thème pour mon travail personnel.

Les avancées technologiques n'ont pas de limites. A l'occasion de la Coupe du monde de football une personne paraplégique a frappé le coup d'envoi de la compétition grâce à un exosquelette.



<https://www.futura-sciences.com/tech/actualites/robotique-exosquelette-contrôle-pensée-ouverture-mondial-54034/>

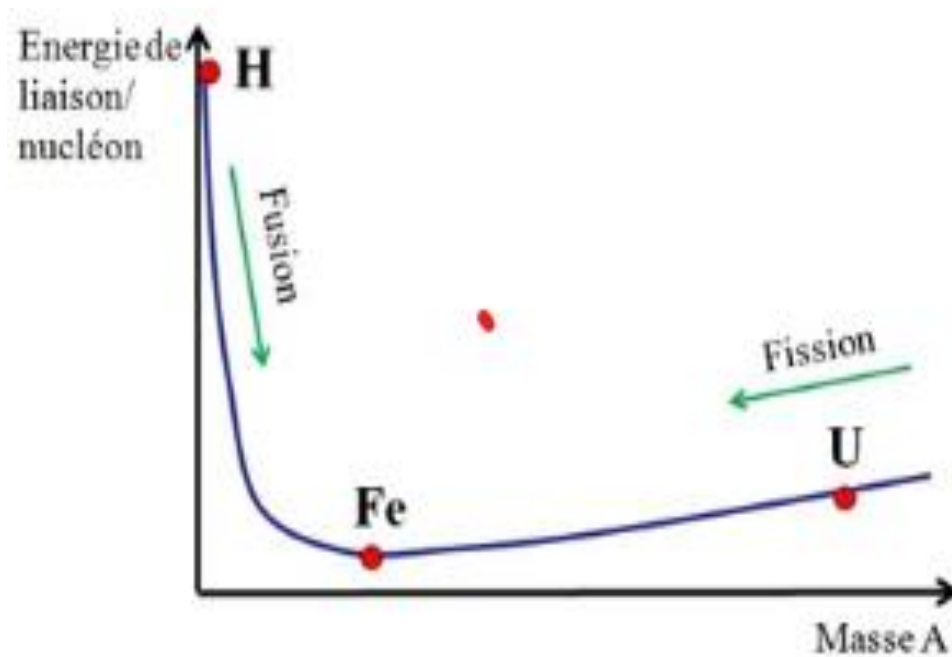
Pour en arriver à la fusion, je me permets de considérer le projet comme étant parmi les performances scientifiques les plus incroyables. Il s'agit de reproduire sur Terre les réactions énergétiques qui ont lieu au cœur du Soleil, et de les confiner dans un réacteur de 29 m de haut sur 28 m de diamètre. Un réacteur qui produira une énergie immense, presque illimitée...

## Instabilité des noyaux atomiques

La règle d'or pour ce qui est de la stabilité d'un noyau (règle d'ailleurs valable pour tout système physique) est d'adopter l'état le plus bas en énergie potentielle<sup>i</sup>. Si un noyau trouve la possibilité d'évoluer vers un état d'énergie inférieure, donc plus stable, il le fera inévitablement.

Un noyau qui se situe au-dessus de la ligne de stabilité est un noyau pour lequel Z (nombre de protons) est plus élevé que la normale. Il présente donc un excès de protons. Un isotope<sup>ii</sup> de ce type tend à être instable : Il aura toujours tendance à rejoindre la stabilité par le chemin le plus court possible. L'instabilité peut également provenir d'un excès de neutrons (N).

Autrement dit la ligne dite de stabilité n'est pas uniforme. Sur cette ligne, la région du fer est la plus



basse en énergie et constitue, sans avoir peur des mots, une sorte « d'eldorado » du nucléaire vers lequel tendent à se diriger tous les noyaux, y compris les isotopes qui sont soit trop lourds, soit trop légers.

Les noyaux trop lourds (excès de protons) ont un moyen simple de rejoindre la région du fer.

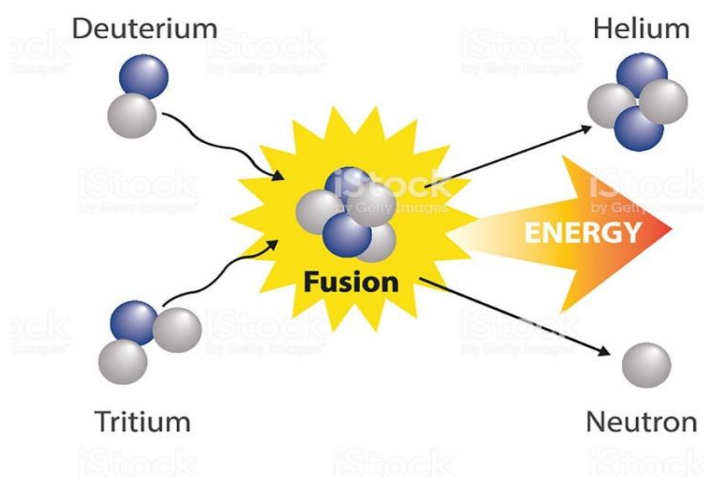
Leur problème étant de devenir plus légers qu'ils ne sont, il s'agit pour eux de se briser en plusieurs morceaux par le phénomène dit de **fission**. Ce phénomène est spontané : Tout noyau lourd qui trouve la possibilité de se transformer en un noyau plus léger en éliminant une partie de sa masse le fera inévitablement.

Les noyaux légers (excès de neutrons) ont aussi intérêt à devenir plus lourds, ce qu'ils ne peuvent bien sûr faire par eux-mêmes. Du lourd peut facilement s'alléger en éliminant. Du léger ne peut devenir lourd à moins que (seule possibilité) plusieurs noyaux s'agglomèrent pour - ensemble - en former un plus massif, ce qu'on appelle la **fusion**. La fusion n'a rien de spontané dans des conditions physiques normales. Elle est même fortement contrariée par la barrière coulombienne (ou répulsion électrostatique) qui s'oppose au rapprochement de deux objets de charge positive. Il faut énormément d'énergie à ces deux objets pour s'approcher très près l'un de l'autre, tellement près que la force d'attraction nucléaire<sup>iii</sup>, de courte portée, entre en jeu et l'emporte sur la répulsion coulombienne<sup>iv</sup>.

## Historique et formule

- En 1920, l'astrophysicien *Arthur Eddington* suggère que l'énergie des étoiles est due à la fusion de noyaux d'hydrogène en hélium.
- En 1934, *Ernest Rutherford* réalise la première réaction de fusion en laboratoire.
- En 1938, *Hans Bethe* et *Carl Friedrich von Weizsäcker* aboutissent à une formule qui donne une valeur approximative de l'énergie de liaison entre les nucléons dans le noyau atomique.
- En 1946, les physiciens britanniques *George Paget Thomson* et *Moses Blackman* déposent le premier brevet de réacteur à fusion nucléaire.
- En 1958, l'Angleterre annonce avoir obtenu des neutrons issus de réactions de fusion : les vérifications montrent que ces neutrons viennent en fait de l'instabilité du plasma (*voir p.7*). Cet échec provoque la mutualisation des recherches au niveau mondial.
- Le 28 septembre 2006, le projet expérimental de fusion nucléaire par confinement magnétique<sup>v</sup> (EAST) de l'Institut de la physique des plasmas de l'Académie des sciences de Chine a réalisé le premier plasma « stable ».

La fusion thermonucléaire, ou plus communément "fusion nucléaire", est le processus dans lequel



deux noyaux atomiques légers s'assemblent pour former un noyau plus lourd. La réaction produit une qui intéresse les scientifiques ; ils espèrent produire de l'électricité à l'échelle industrielle et ainsi trouver une solution de remplacement à la fission nucléaire, source de déchets radioactifs.

La fusion apparaît donc, sur le papier, comme une fantastique source d'énergie. Mais en pratique, c'est une autre histoire. De fait, pour faire fusionner deux atomes, il

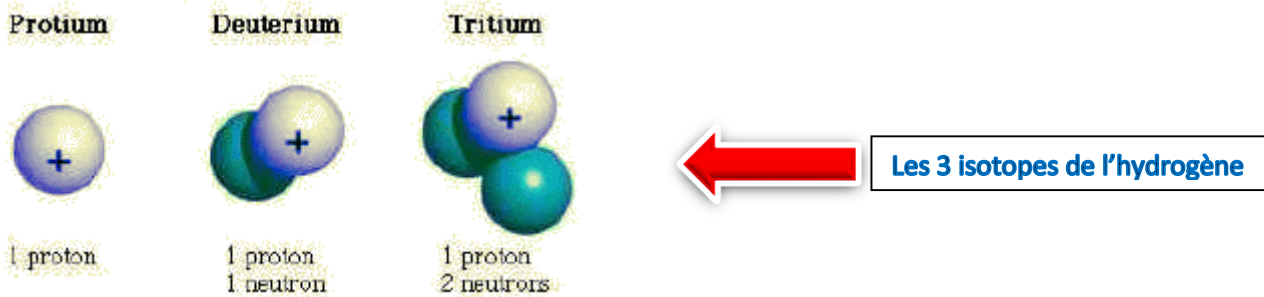
faut vaincre la prodigieuse force de répulsion électrostatique qui éloigne leur noyau chargé positivement. Pour cela, il faut chauffer ces atomes à 150 millions de degrés, jusqu'à obtenir un plasma, ce quatrième état de la matière dans lequel les électrons se désolidarisent des noyaux pour former une "soupe" atomique. Or, aucun matériau ne résiste à une telle fournaise.

La solution ? Le "confinement magnétique" : des aimants ultrapuissants stabilisent le plasma et le maintiennent à bonne distance des parois du réacteur à fusion. Une machine russe, le tokamak, s'est ainsi imposée dans les années 1960 comme le meilleur dispositif pour ce confinement. Mais un tel champ magnétique ne s'obtient qu'au prix d'une dépense énergétique phénoménale. En 1997, le plus grand tokamak actif formait, pendant une seconde, un plasma dégageant 16 mégawatts (MW) pour 24 MW dépensés...

## Les composants de la fusion

*Diverses associations d'isotopes d'éléments légers sont susceptibles de produire une réaction de fusion. Toutefois, dans les machines de fusion, c'est la réaction deutérium-tritium qui se révèle la plus efficace sur Terre.*

- ✓ Deutérium ( $2\text{H}$ ) : Est l'un des deux isotopes stables de l'hydrogène (l'autre étant le protium  $1\text{H}$ ). Le noyau d'un atome<sup>vi</sup> de deutérium, appelé deutéron, contient un proton et un neutron. Le deutérium est présent à l'état naturel en quantité importante dans les océans. Pour obtenir du deutérium, il suffit de distiller de l'eau, qu'il s'agisse d'eau douce ou d'eau de mer.



- ✓ Tritium ( $3\text{H}$ ) : Est un isotope instable de l'hydrogène. Le noyau du tritium, appelé triton, contient un proton et deux neutrons. À la différence du protium et du deutérium, cet isotope est radioactif<sup>vii</sup>. Le tritium n'existe pour ainsi dire pas à l'état naturel ; mais peut toutefois être produit par l'interaction d'un neutron et d'un atome de lithium 6.

Tableau périodique des éléments **Synthèse**

**Énergie abondante** : La fusion d'atomes de manière contrôlée libère près de quatre millions de fois plus d'énergie qu'une réaction chimique telle que la combustion de charbon, de pétrole ou de gaz et quatre fois plus que les réactions de fission nucléaire (à masse égale).

**Durabilité** : les carburants de fusion sont largement disponibles et presque inépuisables. Le deutérium peut être distillé à partir de toutes les formes d'eau, tandis que le tritium sera produit pendant la réaction de fusion lorsque les neutrons de fusion interagiront avec le lithium.

**Pas de  $\text{CO}_2$**  : La fusion n'émet pas de toxines nocives ni de dioxyde de carbone ou d'autres gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Son principal sous-produit est l'hélium : un gaz inerte et non toxique.

**Pas de déchets radioactifs à longue durée de vie** : les réacteurs de fusion nucléaire ne produisent pas de déchets nucléaires à haute activité et à longue durée de vie. La radioactivité des composants dans un réacteur à fusion est suffisamment faible pour que les matériaux soient recyclés ou réutilisés dans 100 ans. Le seul déchet potentiel serait le réacteur en lui-même.

**Risque limité de prolifération :** la fusion n'utilise pas de matières fissiles comme l'uranium et le plutonium (le tritium radioactif n'est pas une matière fissile). Il n'y a pas de matières enrichies dans un réacteur à fusion qui pourraient être exploitées pour fabriquer des armes nucléaires.

**Aucun risque d'effondrement :** Un accident nucléaire de type Fukushima n'est pas possible dans un appareil de fusion tokamak. Il est déjà assez difficile d'atteindre et de maintenir les conditions précises nécessaires à la fusion : en cas de perturbation, le plasma se refroidit en quelques secondes et la réaction s'arrête. La quantité de carburant présent dans le récipient à un moment donné suffit pour quelques secondes seulement et il n'y a aucun risque de réaction en chaîne.



## Conclusion

L'énergie des étoiles provient de la fusion des noyaux d'hydrogène. Cette réaction physique est à masse égale 1 million de fois plus puissante que la plus puissantes des réactions chimiques. On appelle cette réaction fusion thermonucléaire, nucléaire car elle implique les noyaux des atomes. Les scientifiques voulaient exploiter cette réaction en la reproduisant sur Terre dans le but de créer une source presque illimitée d'énergie. Dès 1930, les nations du monde entier se lancèrent dans une « course à la fusion » en créant des machines de plus en plus puissantes. Le premier réacteur à fusion de *George Paget Thomson* et *Moses Blackman* s'imposa. Les scientifiques se rendirent vite compte qu'il était impossible de recréer sur Terre les conditions pour la fusion de l'hydrogène. Ils remarquèrent cependant qu'il était possible d'arriver au même but en utilisant 2 des isotopes de l'hydrogène, le deutérium et le tritium. Bien qu'il soit impossible de recréer les conditions physiques du soleil, on peut tout de même créer un milieu propice à la fusion. C'est donc au cœur d'un tokamak, qui est en fait une chambre à vide que l'on produit cette réaction au sein d'un « plasma » qui est souvent qualifié de quatrième état de la matière.

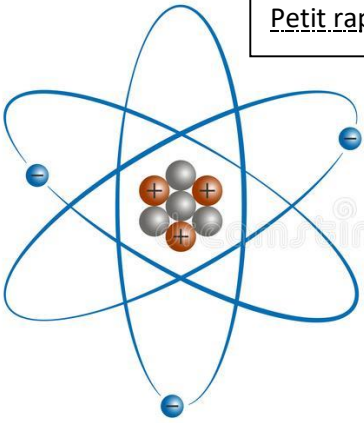
Comme le plasma n'autorise que de faibles densités, il faut monter sa température afin « d'exciter » ses particules. Cette température s'élève jusqu'à 150 millions de degrés, soit près de 10 fois la température interne du Soleil. Pour parvenir à de telles températures, on utilise des ondes radiofréquences (le même genre d'ondes que dans ton four micro-ondes). Il faut également confiner le plasma car n'importe quel matériau est désintégré au contact d'une telle température. Le plasma est sensible à l'action des champs magnétiques. C'est cette propriété qui va permettre de le confiner. En effet, on enferme le plasma dans un champs magnétique formée à l'aide d'aimants supraconducteurs refroidis à des températures proches du zéro absolu. On referme le champ magnétique sur elle-même pour former un tore. On appelle ce champ un champ magnétique toroïdal. Cette approche de la fusion est appelée confinement magnétique.

Il existe cependant une seconde approche de la fusion thermonucléaire sur Terre. Elle se nomme fusion par confinement inertiel. La fusion par confinement inertiel quand à elle n'utilise pas de plasma mais de puissantes impulsions lasers. Contrairement à la fusion magnétique dont le but est d'utiliser une faible densité de combustible et de le faire brûler le plus longtemps possible, la fusion inertielle utilise une énorme densité de matière qui est brûler en quelques picosecondes (milliardième de secondes) par les impulsions lasers. Les premiers tests de la fusions inertielle sont réalisées dans dans installations militaires tel que le Laser MégaJoule où l'on simule l'explosion de bombes atomiques...

Qu'elle soit inertielle ou magnétique, la fusion représente une source potentielle d'énergie propre presque illimité. Une solution de remplacement à la fission nucléaire source de déchets radioactifs pendant des millions d'année



Petit rappel de la structure atomique



Atom structure

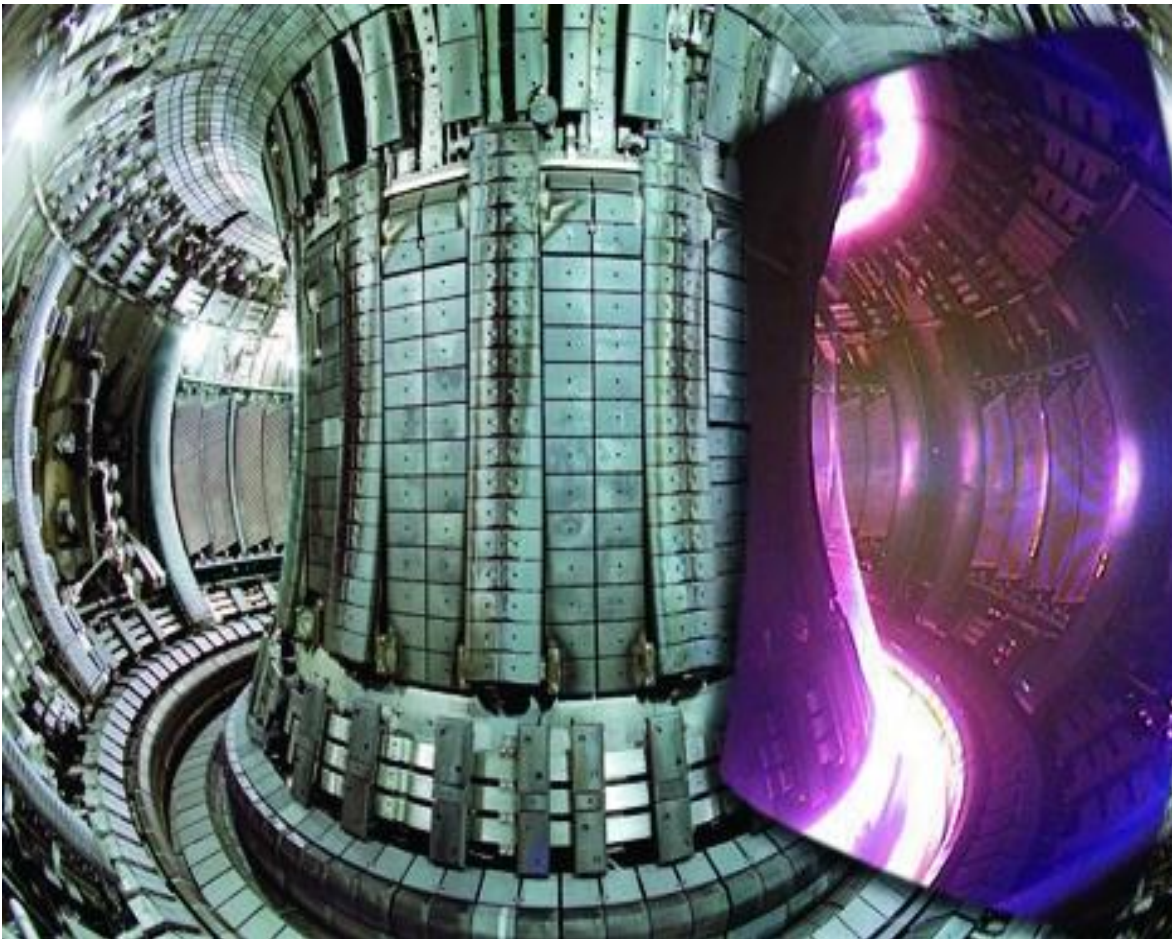
- ⊕ Proton
- Neutron
- ⊖ Electron

## Conditions de fonctionnement

Trois conditions doivent être remplies pour réaliser la fusion en laboratoire :

- Une température très élevée (pour provoquer des collisions à haute énergie).
- Une densité<sup>viii</sup> de particules de plasma suffisante pour augmenter la probabilité de collision (voir page suivante).
- Un temps de confinement suffisant (pour maintenir le plasma, qui a une propension à se dilater, dans un volume défini).

## Qu'est-ce qu'un tokamak ?

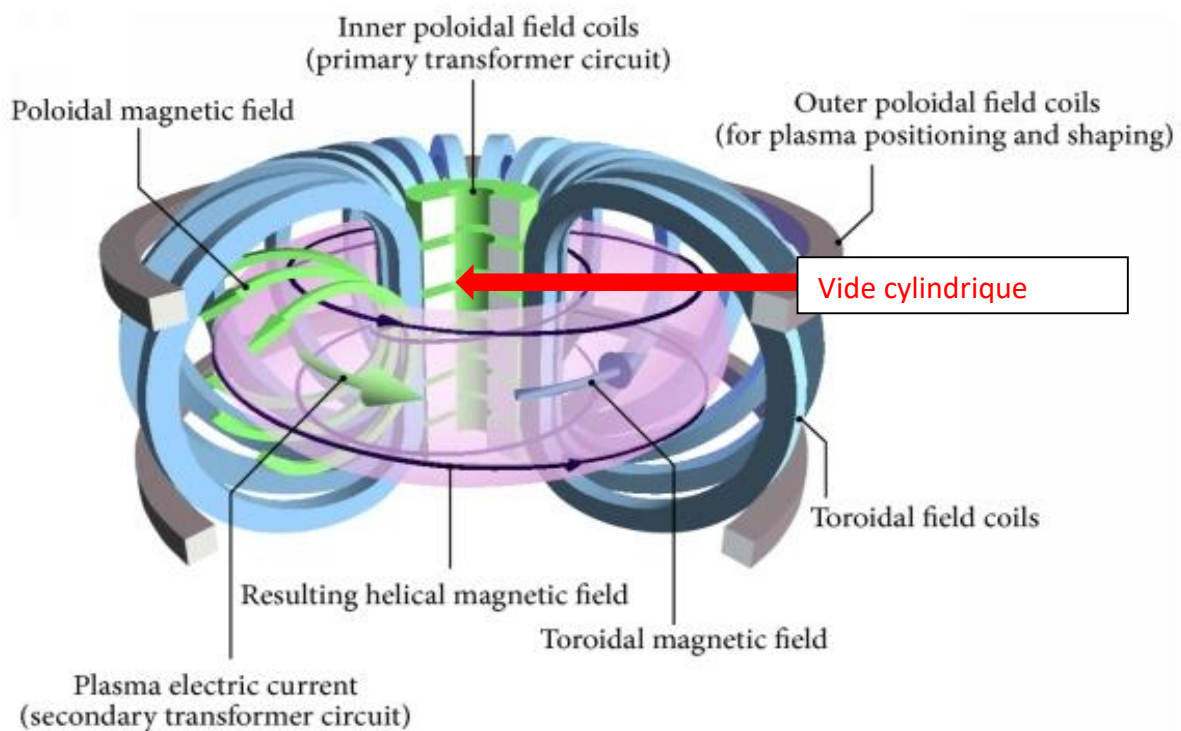


Un tokamak est une machine expérimentale conçue pour exploiter l'énergie de la fusion. À l'intérieur d'un tokamak, l'énergie produite par la fusion d'atomes est absorbée sous forme de chaleur dans les parois du réacteur. Tout comme une centrale électrique conventionnelle, une centrale à fusion utilise cette chaleur pour produire de la vapeur puis de l'électricité au moyen de turbines et de générateurs.

## Le plasma et son rôle

Aux températures extrêmes (positives et négatives), les électrons sont séparés des noyaux et un gaz devient un plasma - un état de matière ionisé<sup>x</sup> semblable à un gaz. Composés de particules chargées, les plasmas sont des environnements très fragiles, près d'un million de fois moins denses que l'air que nous respirons.

Pour faire simple, le plasma est un gaz (dans ce contexte) chaud chargé électriquement. Dans une étoile comme dans un appareil de fusion, les plasmas fournissent l'environnement dans lequel les éléments légers peuvent fusionner et produire de l'énergie.



Le schéma ci-dessus représente le centre du réacteur à fusion (tokamak). Le cœur d'un tokamak est sa chambre à vide. À l'intérieur, sous l'influence d'une chaleur et d'une pression extrêmes, l'hydrogène gazeux devient un plasma. Le processus commence lorsque deux anneaux de plasma composés de deutérium et tritium sont injectés et fusionnent au centre du tokamak. Le plasma à 150 millions de degrés °C est pompé dans un vortex<sup>x</sup> de manière à créer un **vide cylindrique vertical**. À ce moment-là, quelque deux cents pistons frappent le tore<sup>xi1</sup> de tous les côtés pour créer une onde sphérique d'énergie qui devient une onde de choc et doit comprimer le plasma, déclenchant la fameuse réaction dite de fusion nucléaire.

<sup>1</sup> La chambre à vide d'un tokamak peut avoir une forme toroïdale ou sphérique.

## Comment obtenir un plasma à 150 millions de °C ?

Pour obtenir une réaction de fusion, il faut placer dans la chambre à vide une certaine quantité d'un mélange gazeux composé à parts égales de deutérium et de tritium.



En appliquant une forte décharge électrique à ce mélange, celui-ci devient un plasma. Les électrons sont alors arrachés aux atomes et le milieu devient conducteur<sup>xii</sup>.

Le courant électrique circulant dans le plasma fera augmenter progressivement la température de celui-ci. Cette technique (le **chauffage ohmique**) nous permet d'atteindre une température de l'ordre de 10

millions de degrés C.

Pour aller au-delà, d'autres techniques sont mises en œuvre :

- ✚ **Le chauffage par ondes radiofréquence** (comme dans un four à micro-ondes)



- ✚ **L'injection de particules<sup>xiii</sup>** de très haute énergie au cœur du plasma — un peu comme le garçon de café qui chauffe un pot de lait en soumettant son contenu à un jet de vapeur sous pression.



Ces deux techniques sont chacune à même de porter le plasma à la température requise. ITER, qui est un réacteur expérimental, permettra de choisir laquelle des deux est la plus adaptée au fonctionnement d'un réacteur industriel.

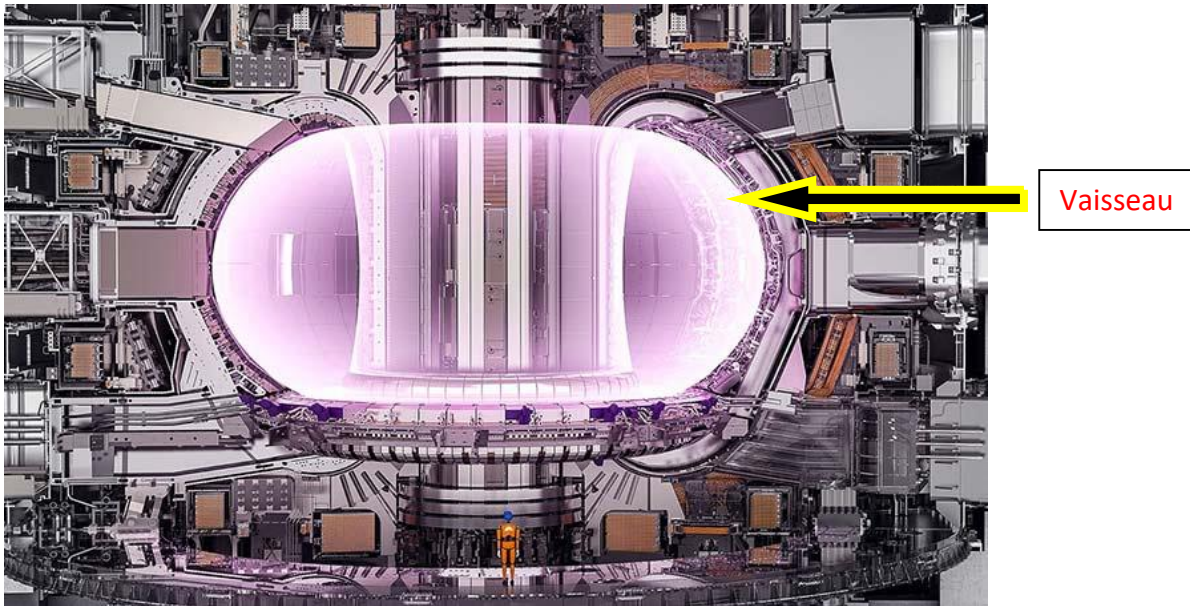




## Comment peut-on contenir le plasma ?

Les particules chargées du plasma peuvent être façonnées et contrôlées par les bobines magnétiques massives placées autour du vaisseau ; les physiciens utilisent cette propriété importante pour confiner le plasma chaud loin des parois du vaisseau (cf. schéma ci-dessous).

En résumé, le plasma est confiné au sein du réacteur de fusion nucléaire dans un intense champ magnétique toroïdal, afin qu'il n'entre pas en contact direct avec la paroi du réacteur.



## Le processus

Pour démarrer le processus, l'air et les impuretés sont d'abord évacués de la chambre à vide. Ensuite,



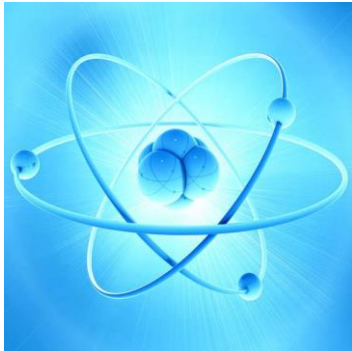
les systèmes magnétiques qui aideront à confiner et à contrôler le plasma sont chargés et le carburant gazeux est introduit. Lorsqu'un courant électrique puissant traverse le récipient, le gaz se décompose électriquement, s'ionise (les électrons sont retirés des noyaux) et forme un plasma.

Lorsque les particules de plasma deviennent « excitées<sup>xiv</sup> » et entrent en collision, elles commencent également à chauffer. Les méthodes de chauffage auxiliaire contribuent à amener le plasma à des températures de fusion (entre 150 et 300 millions de degrés °C). Les particules « excitées » à un tel degré surmontent leur répulsion<sup>xv</sup> électromagnétique naturelle lors de la collision afin de fusionner, libérant d'énormes quantités d'énergie.

## Le problème des neutrons

Nous avons vu dans la première vidéo « la fusion magnétique » que le flux intense de neutrons dû à la réaction de fusion nucléaire pouvait poser problème. Mais de quel problème s'agit-il ?

Les neutrons sont comme les photons de la radioactivité gamma, des particules indirectement ionisantes<sup>xvi</sup>. Tout comme les rayons gamma, ils sont donc potentiellement dangereux pour la santé.



On peut rencontrer des flux intenses de neutrons énergétiques, et donc dangereux, au voisinage immédiat des réacteurs nucléaires ou lors d'explosions d'armes atomiques, en particulier des bombes à neutrons. Mais ce sont surtout les neutrons solaires qui peuvent poser problème, plus généralement des rayons cosmiques. On rencontre ces neutrons générés par l'impact des noyaux d'hydrogène et d'hélium des rayons cosmiques sur ceux de l'atmosphère à de très hautes altitudes et aux pôles.

L'activation neutronique est le processus par lequel un flux neutronique induit de la radioactivité dans les matériaux qu'il traverse (phénomène de radioactivation).

Tout matériau traversé par un flux de neutrons subit progressivement une transmutation par capture neutronique qui rend une partie de ses noyaux radioactifs, et la durée de vie de cette radioactivité impose généralement de le gérer par la suite comme déchet radioactif.

Les déchets nucléaires ont toujours été un casse-tête environnemental, aujourd'hui il se pourrait bien que le problème devienne la solution.

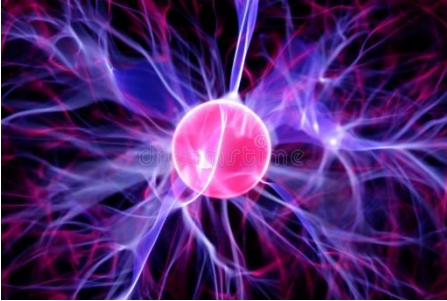
Des scientifiques ont mis au point une méthode pour transformer ces déchets en batterie. En encapsulant les matières radioactives dans un diamant artificiel, on peut générer une charge électrique et bloquer les radiations ! L'équipe ayant travaillé sur ce projet a utilisé un isotope de nickel pour ses essais, mais un isotope de carbone pourrait être utilisé. Le carbone étant présent dans les blocs de graphite des centrales nucléaires. Ces batteries ne pourront toutefois pas être de grande puissance mais auront une longévité sans précédent due au rayonnement radioactif. D'après les chercheurs, une batterie à base de carbone pourrait générer 50% de sa charge en 5730 ans ! Ces petites batteries pourraient être utilisées pour les drones à haute altitude, les stimulateurs cardiaques, ou les engins spatiaux et tous les endroits difficiles d'accès où le changement de batterie nécessite une grosse logistique.



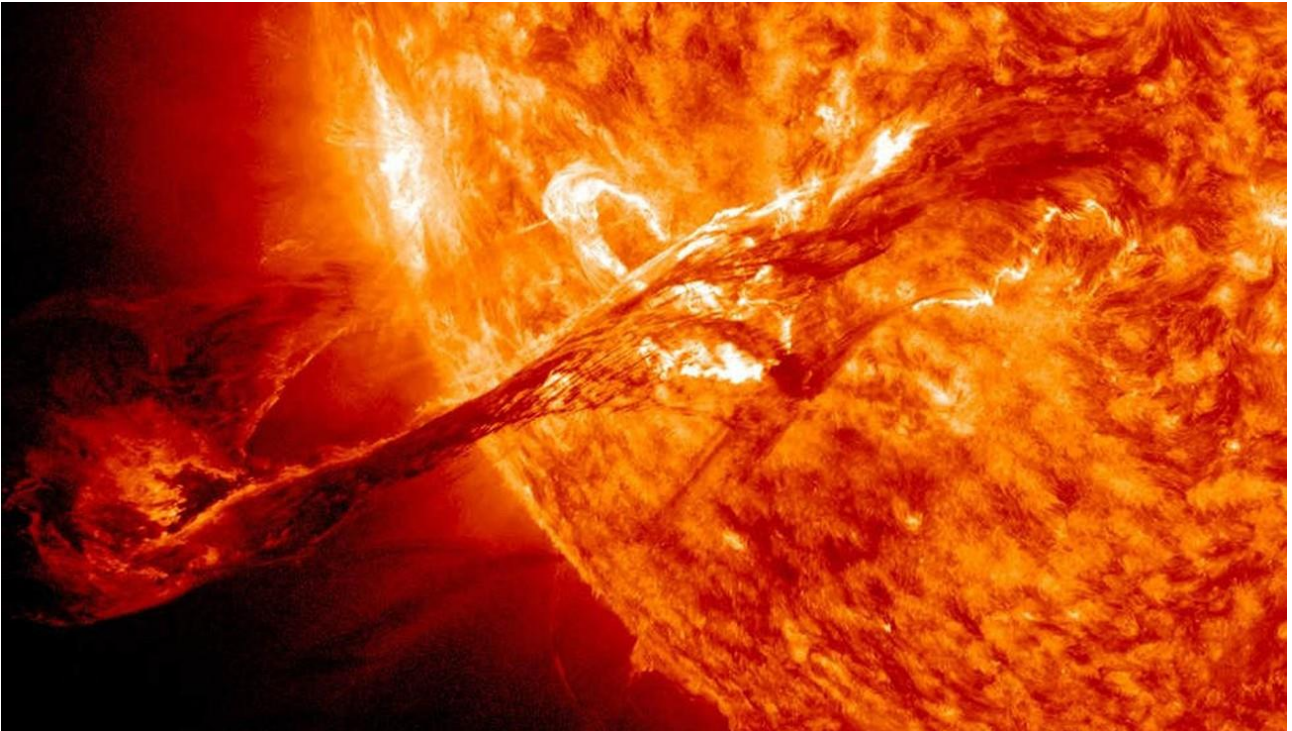
Le problème du diamant c'est que ça reste du diamant, c'est cher. Convertir des grosses quantités de déchet nucléaires en batteries demeure pour l'instant un doux rêve. En tout cas on a trouvé une utilité aux déchets nucléaires.

## Incertitude majeure

Il reste la principale incertitude d'ordre scientifique : parviendra-t-on à dompter les "disruptions" du plasma ? Au sein d'un confinement magnétique, la différence de pression entre le centre du plasma et ses extrémités peut mener à des libérations d'énergie massives et ponctuelles, comparables aux éruptions solaires ! Non contrôlées, elles peuvent toucher la paroi du tokamak et l'endommager sévèrement.



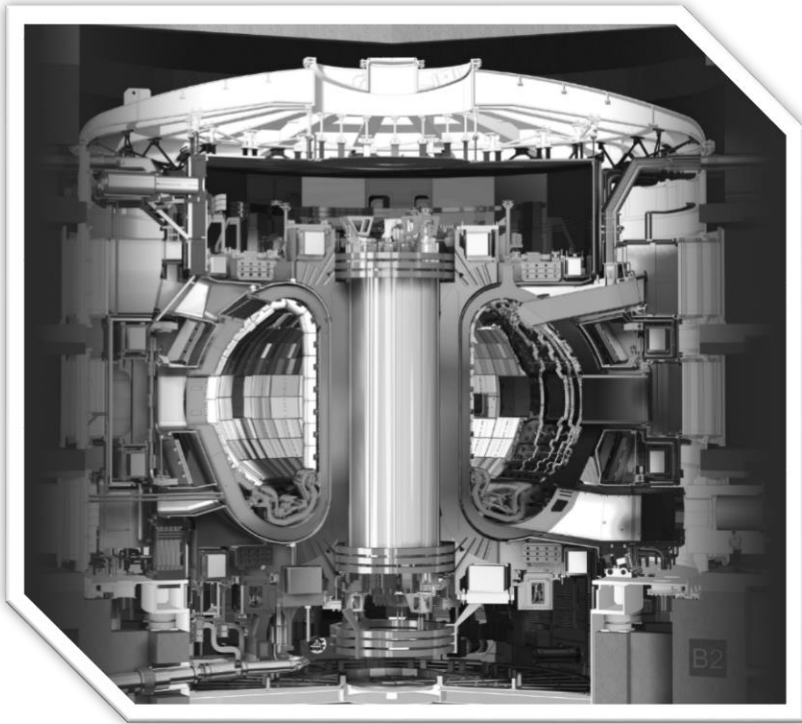
Les ingénieurs disposent de méthodes pour détecter ces éventuelles irrégularités, telle l'injection de gaz inerte qui permet de refroidir localement le plasma. Problème : ces modèles sont surtout empiriques, basés sur l'observation des tokamaks. Au niveau de la physique fondamentale, on ne comprend toujours pas comment se forment les turbulences dans le plasma. Les modèles existants ne rendent pas compte de son immense complexité. Dès lors, impossible de prédire si les extrapolations seront 100 % fiables.





## Le projet ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor)

Les pays signataires du projet sont la Chine, l'Union européenne, l'Inde, le Japon, la Corée, la Russie et les États-Unis. L'organisation a également conclu des accords de coopération technique non-



membres avec l'Australie (par le biais de l'Australian Nuclear Science and Technology Organisation) et le Kazakhstan (par le biais du Centre nucléaire national du Kazakhstan). Chaque pays-membre a créé une agence nationale pour s'acquitter de ses responsabilités en matière d'approvisionnement auprès d'ITER. Ces agences emploient leur propre personnel, ont leur propre budget et passent directement des contrats avec l'industrie.

L'UE est responsable de la plus grande partie des coûts de construction (45,6%). Les membres apportent très peu de

contribution monétaire au projet, 90% des contributions sont livrées sous forme de composants, de



systèmes ou de bâtiments. De cette manière, l'élite scientifique et industrielle de chaque membre est préparée à la réalisation du tokamak qui produira de l'électricité à l'échelle industrielle.

Pour tous les membres, les avantages potentiels de la participation sont importants : en ne contribuant qu'à une partie des coûts du projet, les membres bénéficient de la totalité des résultats scientifiques.

Alors que l'installation scientifique s'élève sur un site à Cadarache dans le sud de la France, la fabrication de la machine est en cours partout dans le monde. Selon un calendrier soigneusement planifié, les composants achevés sont expédiés vers le site pour leur intégration au sein du réacteur.

## Le tokamak ITER et ses principaux composants

Par rapport au Tokamak ITER, une navette spatiale, un porte-avions et un sous-marin nucléaire sont tous des objets relativement simples : leurs technologies sont bien testées et leur fabrication est pratiquement industrialisée.

Cependant, ITER est tout à fait unique et un grand nombre de ses composants seront les premiers du genre. Bien que d'autres grands tokamaks aient été construits dans le monde, aucun d'entre eux ne ressemble au tokamak qui sera assemblé à Cadarache en termes d'échelle et de complexité. À la complexité d'ITER s'ajoute un programme d'approvisionnement unique qui répartit la fabrication des composants et des systèmes de la machine entre les sept membres ITER.

Si le projet ITER visait « uniquement » à construire et à exploiter le plus grand tokamak du monde, les choses seraient plus simples. Mais ITER est plus que cela. Dès le début, le projet a été conçu avec l'idée que les membres, par leur participation, feraient chacun progresser leur propre base scientifique, technologique et industrielle dans la fusion, et prépareraient ainsi la prochaine étape, un réacteur de fusion de démonstration. En conséquence, les membres d'ITER sont largement impliqués dans l'achat de composants et de systèmes.

Finalisée début 2006, la répartition des tâches de fabrication en nature était fondée à la fois sur les intérêts et sur les capacités techniques et industrielles de chacun des membres. La Chine, l'Inde, le Japon, la Corée, la Russie et les États-Unis ont chacun convenu de couvrir 9,1% de la construction d'ITER. L'Europe, hôte du projet ITER, y participe à hauteur de 45%, comprenant une part des composants et systèmes ITER ainsi que la quasi-totalité des bâtiments de l'installation scientifique. Pour son plus grand investissement, l'Europe récolte également les retombées économiques. Pour gérer toutes ces contributions en nature, l'organisation ITER - qui coordonne le projet - a déjà signé près de 100 accords de passation de marchés avec les agences nationales ITER. Ces agences, à leur tour, sous-traitent à l'industrie pour la fabrication du composant selon les conditions très spécifiques énoncées dans les documents d'arrangement en matière d'approvisionnement. Depuis le début du processus, plus de 1 800 contrats de conception ou de



fabrication ont été attribués par les agences nationales ITER. Dans les usines des trois continents, les composants et les systèmes de l'usine ITER prennent maintenant forme. Le tout sera comme travailler sur le plus grand ensemble de monteurs au monde, avec au moins un million de composants et plus de 10 millions de pièces individuelles. La gestion d'un système d'approvisionnement international aussi unique peut souvent être lourde et complexe, mais sans elle, ITER n'existerait tout simplement pas.

Concevoir le plus grand tokamak du monde ... obtenir le soutien de partenaires internationaux autour d'un projet commun ... il fallait absolument aller au-delà de la relation client-fournisseur traditionnelle. Une toute nouvelle forme de partenariat devait être inventée : celle qui préserverait les intérêts des membres et du projet dans son ensemble. C'est le défi d'ITER, mais aussi son attrait : un projet fondé sur l'idée d'une collaboration scientifique à grande échelle pour le bien de tous.

UN GÉANT

23000 t

Poids de la machine

10X LE CŒUR DU SOLEIL

150

million °C

Température plasma

ÉNERGIE DE FUSION

500

MW

Puissance de sortie



## LE TOKAMAK ITER

Le tokamak est une machine expérimentale conçue pour exploiter l'énergie de la fusion. ITER sera le plus grand tokamak du monde, avec un rayon de plasma (R) de 6,2 m et un volume de plasma de 840 m<sup>3</sup>.

LIRE LA SUITE



PLUS LOURD QUE LA TOUR  
EIFFEL

8000 t

Chambre à plasma en acier

LE PLUS GRAND PARMIS LES  
TOKAMAKS

840 m<sup>3</sup>

Volume plasma

RAYON D'ENREGISTREMENT

6 m

Rayon principal du plasma (6,2 m)

## RÉCIPIENT SOUS VIDE

Le récipient sous vide en acier inoxydable abrite les réactions de fusion et agit comme une première barrière de confinement de sécurité.

LIRE LA SUITE

PRÉCISION MODULAIRE

# 54

Cassettes

ENDUIT DE TUNGSTÈNE

# 20

MM<sup>3</sup> / m<sup>2</sup>

Charge thermique la plus élevée

CHAQUE CASSETTE

# dix

Positionné par télémanipulation

## DÉVIATEUR

Placé au fond de la cuve à vide, le divertor contrôle l'évacuation des gaz résiduels et des impuretés du réacteur et résiste aux charges thermiques de surface les plus élevées de la machine ITER.

LIRE LA SUITE

## VIDE DE CRYOSTAT

**1**  
millions de

fois moins dense que l'air

MASSIF

**3800**  
<sup>t</sup>en

acier

LA PLUS GRANDE CHAMBRE À  
VIDE EN ACIER INOXYDABLE AU  
MONDE

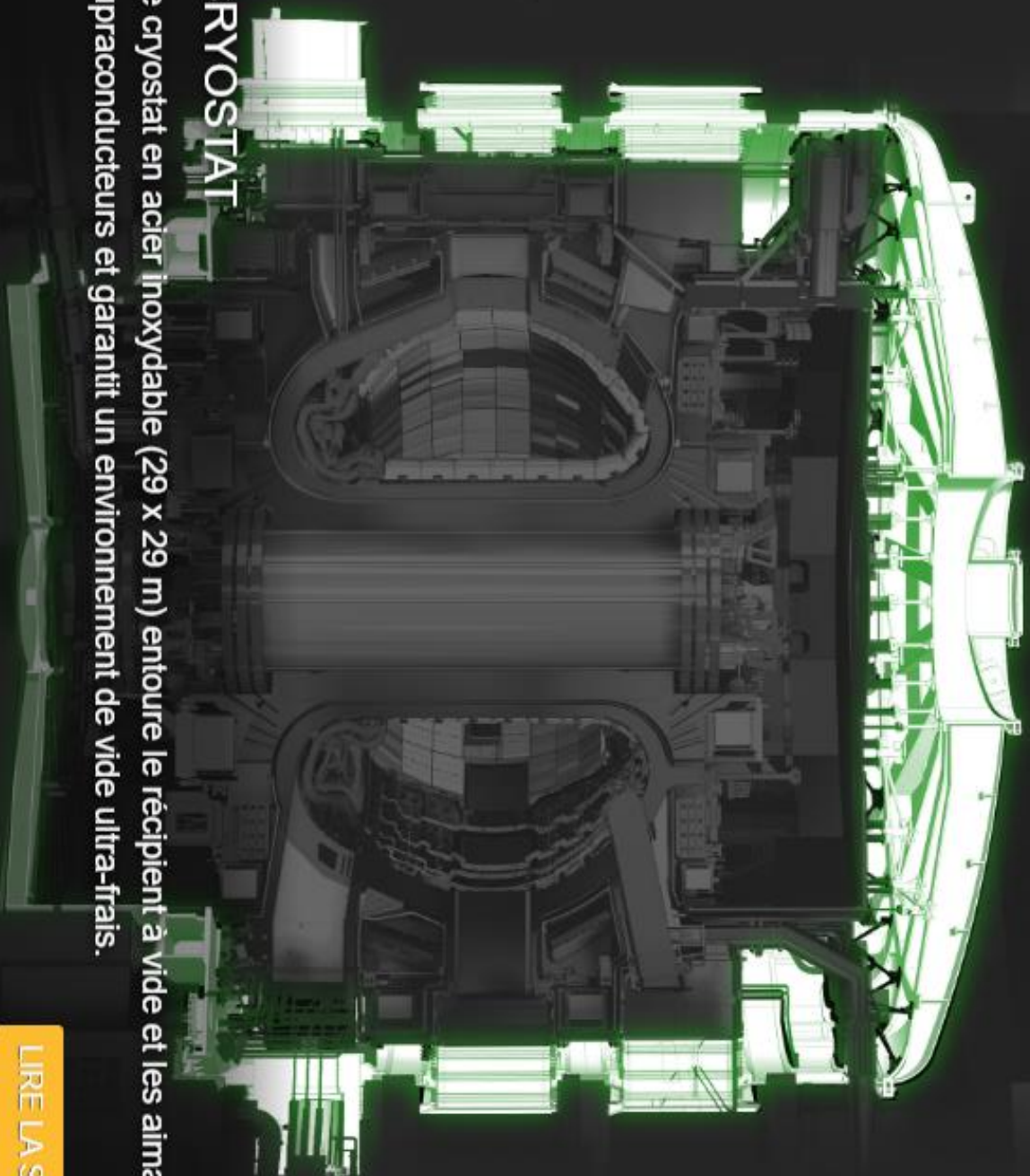
**16000**  
<sup>m</sup>3

Volume total

## CRYOSTAT

Le cryostat en acier inoxydable (29 x 29 m) entoure le récipient à vide et les aimants supraconducteurs et garantit un environnement de vide ultra-frais.

[LIRE LA SUITE](#)





LIMITE DE PROTECTION

440

Modules de couverture

1ÈRE COUVERTURE  
ACTIVEMENT REFFROIDIE

736<sub>MW</sub>

Charge thermique maximale

COUVRANT 600 M2

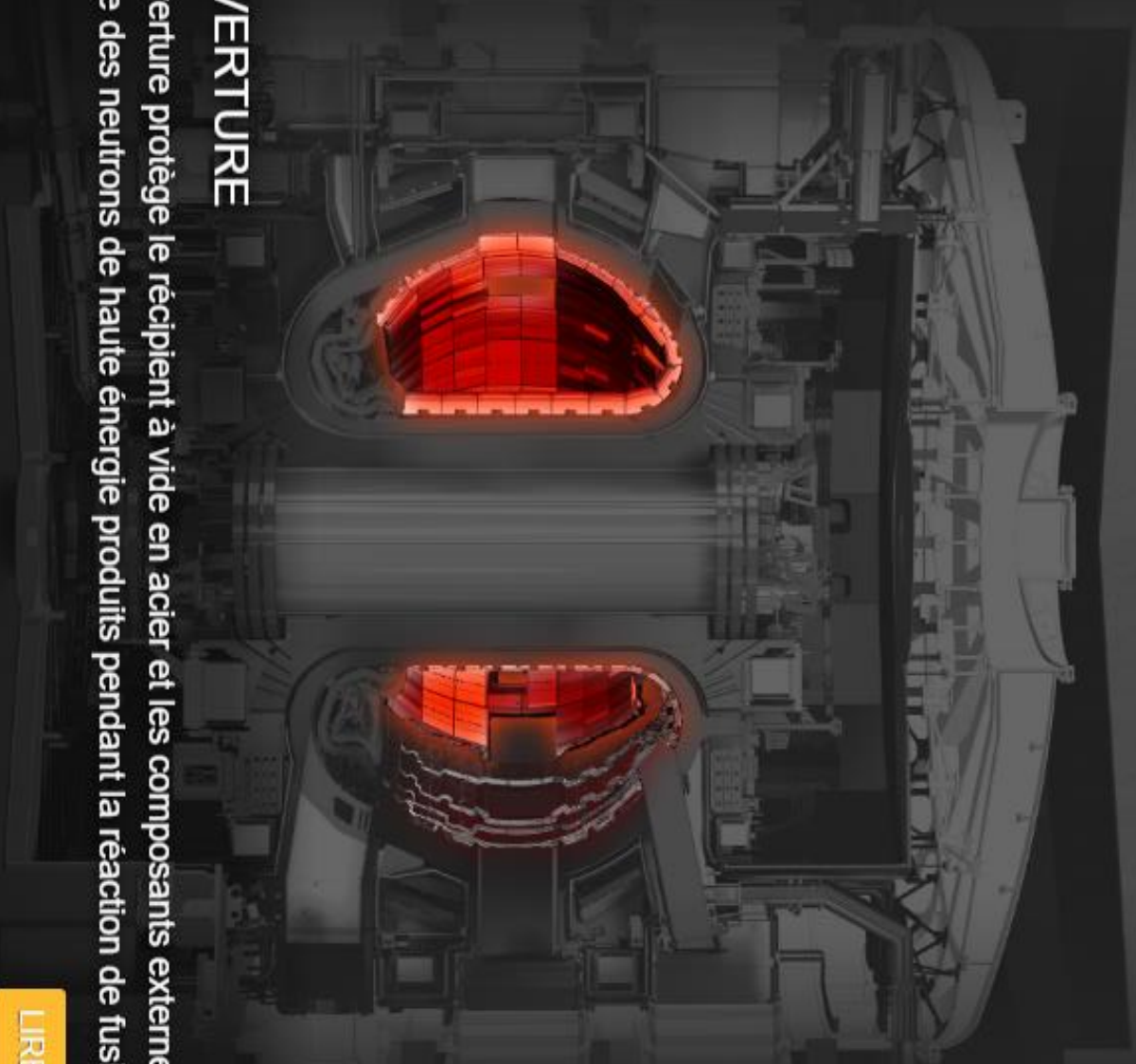
180

Variantes de conception

## COUVERTURE

La couverture protège le récipient à vide en acier et les composants externes de la machine des neutrons de haute énergie produits pendant la réaction de fusion.

[LIRE LA SUITE](#)





UN COUP DE POING

51<sub>GJ</sub>

Energie magnétique stockée

PLUS FROID QUE PLUTON

4<sub>K</sub>

Température de l'aimant (-269 °C)

2X DANS LE MONDE

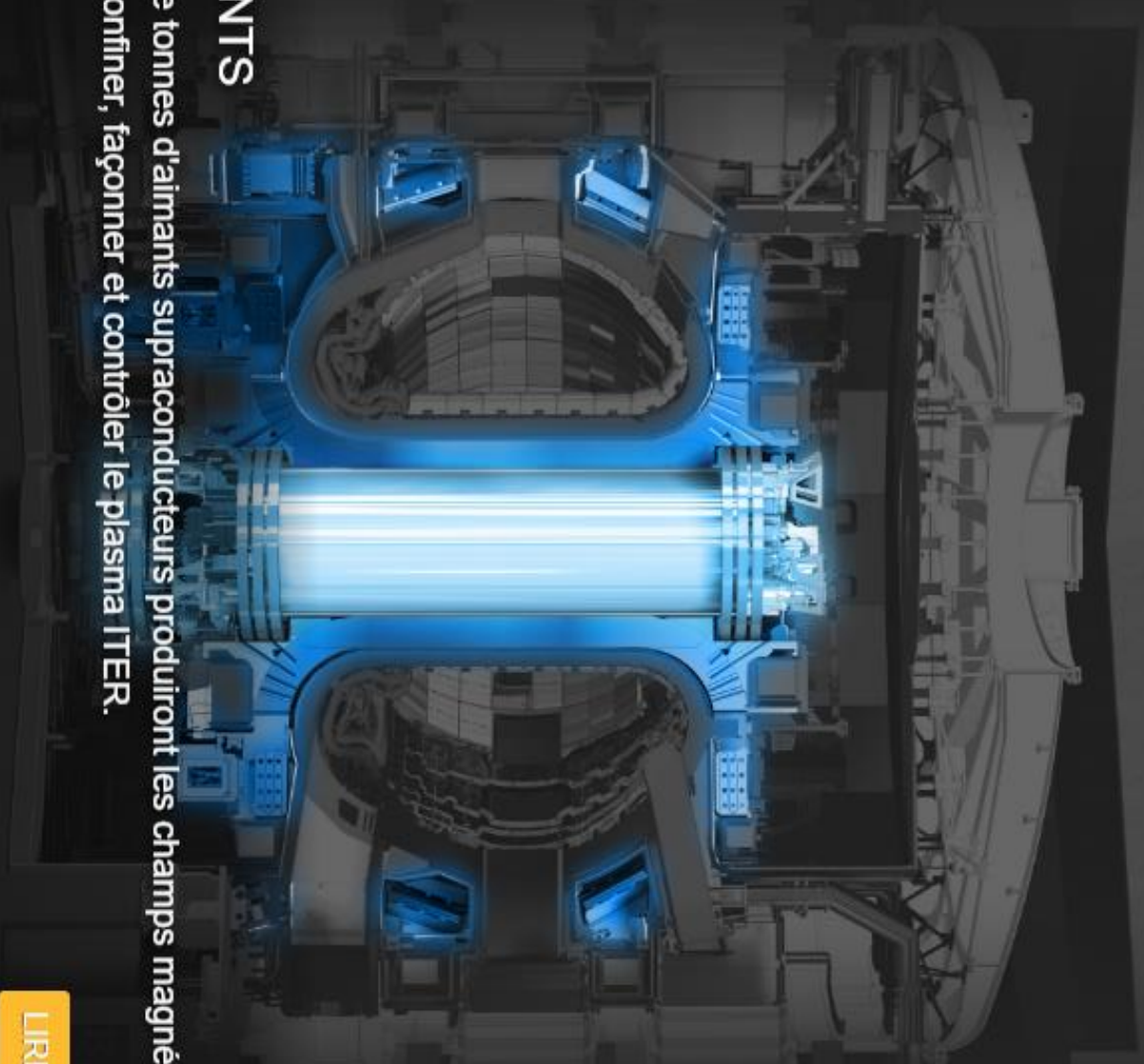
100000<sub>km</sub>

Nb3Sn toron supraconducteur

## AIMANTS

Dix mille tonnes d'aimants supraconducteurs produiront les champs magnétiques pour initier, confiner, façonner et contrôler le plasma ITER.

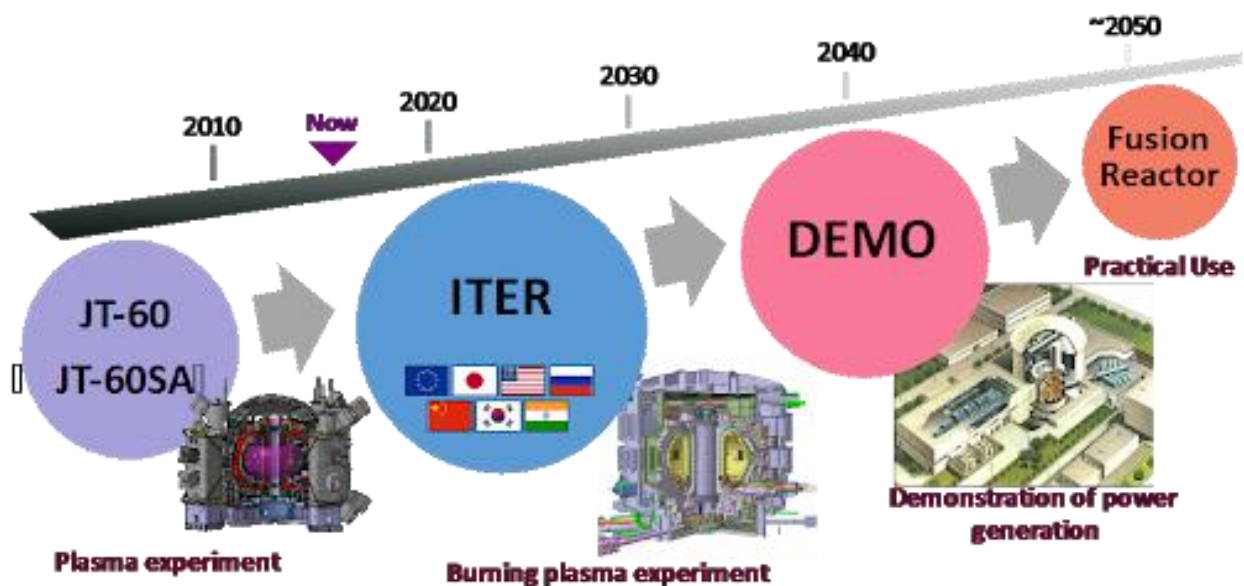
LIRE LA SUITE



## Après ITER

Si les expérimentations avec ITER portent leurs fruits, un autre réacteur de fusion nucléaire pourrait prendre sa place d'ici 2040. Il s'agit de **DEMO** (Demonstration Power Plant), un réacteur qui devrait fonctionner en continu et, contrairement à ITER, être relié au réseau électrique. Comme son nom l'indique, ce sera donc un démonstrateur industriel grâce auquel des prototypes moins coûteux pourraient ensuite être assemblés dans un but commercial. DEMO devrait être en mesure de produire au minimum une énergie de fusion de 2 gigawatts pour un facteur  $Q=25$  (il produirait 25 fois plus que ce qu'il ne consommerait).

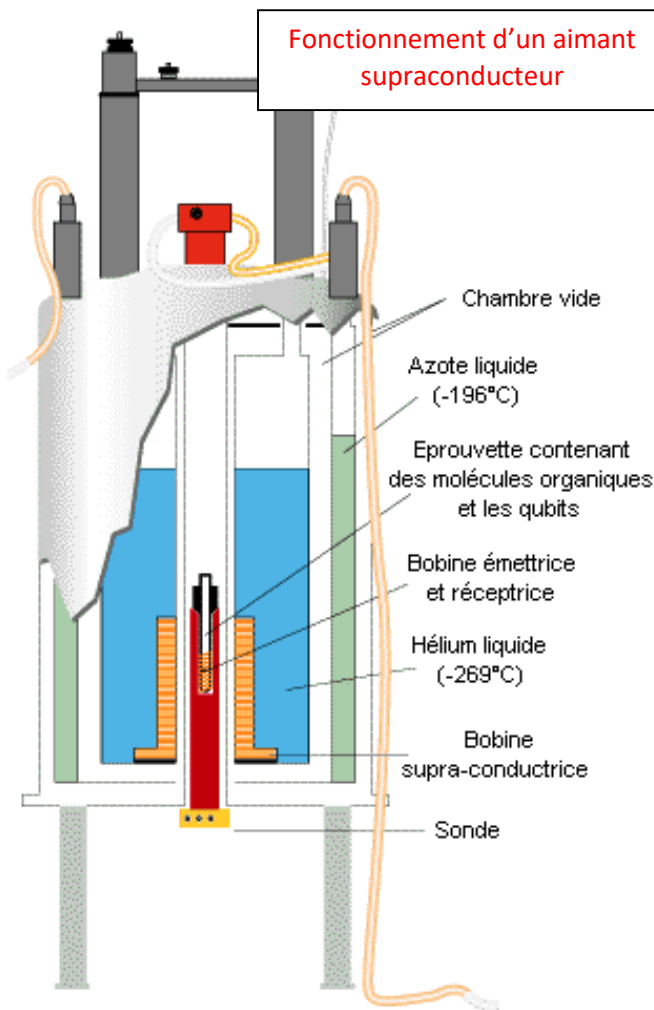
Si l'on s'en tient au calendrier ainsi qu'à la réussite du projet ITER, la première démonstration de production d'électricité aurait lieu en 2048. S'en suivrait la mise en œuvre d'un autre projet, nommé **PROTO**, qui ferait office de prototype de centrale électrique.



Contrairement à Iter, Demo devra fabriquer une partie de son carburant thermonucléaire comme sous-produit de son fonctionnement. En l'occurrence, il s'agit d'un isotope de l'hydrogène, le tritium radioactif, dont il n'existe pas de sources naturelles sur Terre. La fusion sera effectuée entre ce tritium et le deutérium (extrait de l'eau de mer). Le flux des neutrons engendré devrait à son tour produire des noyaux de tritium, par exemple à partir d'une couverture en lithium de l'intérieur du réacteur de Demo.

## Confinement magnétique avec JT-60SA

La recherche sur la fusion magnétique contrôlée ne s'est pas figée au moment où la construction d'Iter a été lancée. De nouveaux modes de confinement du plasma ont été envisagés pour produire davantage d'énergie qu'Iter. Le Japon veut les étudier de plus près en gardant Demo à l'esprit. C'est pourquoi le projet prévoit d'améliorer JT-60U (*Japan Torus-60 Upgrade*).



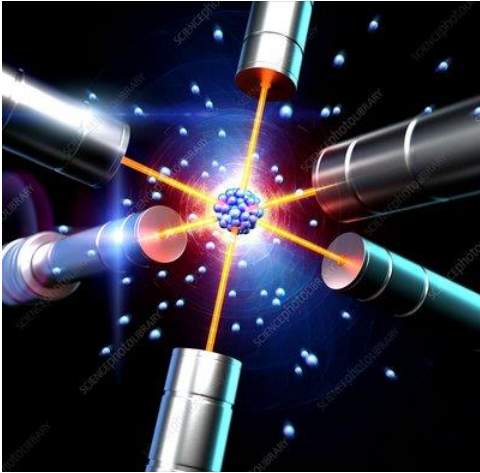
JT-60SA (pour *Super Advanced*) sera équipé de 18 bobines en forme de D constituant des aimants supraconducteur<sup>xvii</sup> en niobium-titane<sup>xviii</sup> refroidis avec de l'hélium liquide supercritique<sup>xix</sup> à quelques degrés au-dessus du zéro absolu<sup>xx</sup>. Quand il sera opérationnel à l'horizon 2020, il sera le plus grand tokamak doté de ces aimants en fonctionnement, en attendant Iter qui le détrônera.

Les aimants supraconducteurs permettent d'atteindre de forts champs magnétiques du fait de l'annulation de la résistance au passage du courant, sans quoi l'effet Joule<sup>xxi</sup> produit ferait fondre ces aimants. D'infimes surchauffes peuvent toutefois s'y manifester, rendant localement les aimants à nouveau résistifs<sup>xxii</sup>. Il se produit alors une transition résistive locale. Ce qui provoque bien sûr un échauffement par effet Joule plus important de l'aimant et de l'hélium liquide, lequel va se vaporiser, ce qui ne va rien arranger.

On sait gérer ce genre de problème en s'arrangeant pour que l'énergie stockée dans les aimants soit dissipée dans une résistance externe. Cela permet de minimiser l'augmentation de température et les contraintes mécaniques qui pourraient apparaître.

## La fusion par confinement inertiel laser

Nous avons déjà parlé d'ITER en France. Ce réacteur expérimental, en construction en Provence, fera progresser le contrôle de la fusion thermonucléaire dans une « enceinte magnétique ». Mais il ne représente pas la seule voie envisageable vers l'exploitation de l'énergie des étoiles. Le problème de l'énergie est crucial et l'étude d'alternatives n'est pas à négliger.

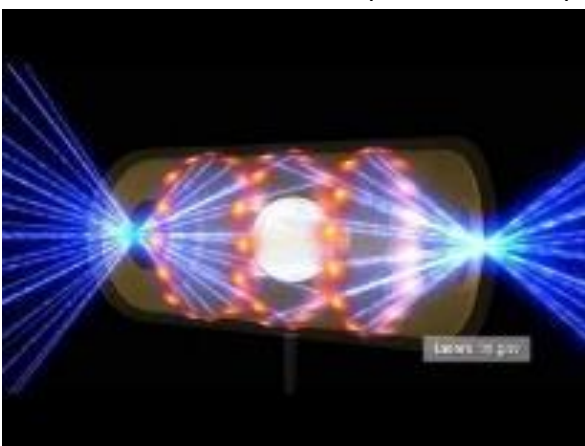


L'alternative la plus prometteuse est la fusion contrôlée par **confinement inertiel, par laser**. Elle consiste à allumer de petites pastilles de combustible au moyen d'impulsions laser. Par rapport à la fusion par **confinement magnétique**, la fusion par laser présente au moins trois avantages : elle ne nécessite pas un dispositif de confinement dans la chambre de réaction ; elle autoriserait d'autres réactions que la fusion deutérium-tritium, qui produit des neutrons problématiques ; elle suppose un investissement énergétique plus faible pour un gain thermonucléaire plus grand, ce qui promet des installations plus petites et moins coûteuses.

Le confinement inertiel laser repose sur un principe simple : produire un plasma de très haute densité (supérieure d'un facteur  $10^9$  à celui de la fusion par confinement) en un temps de réaction extrêmement court (de l'ordre du milliardième de seconde). Il s'agit de l'extrême opposé à la fusion magnétique qui fonctionne avec un plasma de faible densité et un temps de réaction pouvant aller jusqu'à 6 minutes. Le principal projet est une collaboration de 9 pays européens nommée HIPER (High Power laser Energy Research).

### Le processus (voir schéma p.24) :

On enferme dans une toute petite bille de quelques millimètres de diamètre un mélange de tritium



(T) et de deutérium (D) et on soumet celle-ci aux feux croisés de plusieurs impulsions laser longues et très énergétiques afin d'exercer une pression uniforme sur toute la surface de la bille. Par ailleurs, la température élevée **vaporise** le matériel qui en s'échappant dans toutes les directions de la bille ajoute une pression isotrope<sup>xxiii</sup> supplémentaire. Le résultat est l'obtention d'une densité de  $300 \text{ gr/cm}^3$  et une température 100 millions de degrés Celsius. La réaction de fusion peut alors s'enclencher et tout le problème est d'obtenir plus d'énergie par ce moyen que n'en consomme

l'allumage de la réaction de fusion.

## Synthèse

**Énergie abondante** : La fusion d'atomes de manière contrôlée libère près de quatre millions de fois plus d'énergie qu'une réaction chimique telle que la combustion de charbon, de pétrole ou de gaz et quatre fois plus que les réactions de fission nucléaire (à masse égale).

**Durabilité** : les carburants de fusion sont largement disponibles et presque inépuisables. Le deutérium peut être distillé à partir de toutes les formes d'eau, tandis que le tritium sera produit pendant la réaction de fusion lorsque les neutrons de fusion interagiront avec le lithium.



**Pas de CO<sub>2</sub>** : La fusion n'émet pas de toxines nocives ni de dioxyde de carbone ou d'autres gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Son principal sous-produit est l'hélium : un gaz inerte et non toxique.

**Pas de déchets radioactifs à longue durée de vie** : les réacteurs de fusion nucléaire ne produisent pas de déchets nucléaires à haute activité et à longue durée de vie. La radioactivité des composants dans un réacteur à fusion est suffisamment faible pour que les matériaux soient recyclés ou réutilisés dans 100 ans. Le seul déchet potentiel serait le réacteur en lui-même.

**Risque limité de prolifération** : la fusion n'utilise pas de matières fissiles comme l'uranium et le plutonium (le tritium radioactif n'est pas une matière fissile). Il n'y a pas de matières enrichies dans un réacteur à fusion qui pourraient être exploitées pour fabriquer des armes nucléaires.

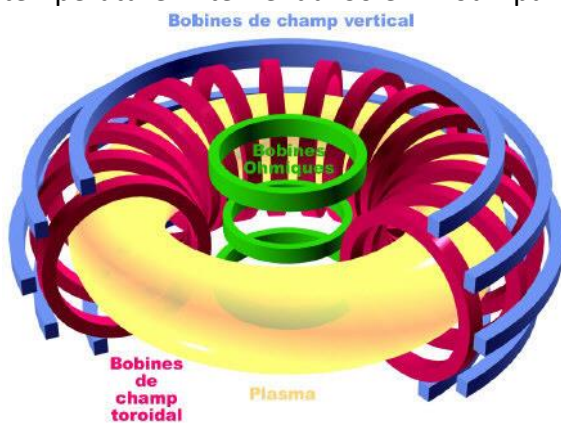
**Aucun risque d'effondrement** : Un accident nucléaire de type Fukushima n'est pas possible dans un appareil de fusion tokamak. Il est déjà assez difficile d'atteindre et de maintenir les conditions précises nécessaires à la fusion : en cas de perturbation, le plasma se refroidit en quelques secondes et la réaction s'arrête. La quantité de carburant présent dans le récipient à un moment donné suffit pour quelques secondes seulement et il n'y a aucun risque de réaction en chaîne.



## Conclusion

L'énergie des étoiles provient de la fusion des noyaux d'hydrogène. Cette réaction physique est à masse égale 1 million de fois plus puissante que la plus puissantes des réactions chimiques. On appelle cette réaction fusion thermonucléaire, nucléaire car elle implique les noyaux des atomes. Les scientifiques voulaient exploiter cette réaction en la reproduisant sur Terre dans le but de créer une source presque illimitée d'énergie. Dès 1930, les nations du monde entier se lancèrent dans une « course à la fusion » en créant des machines de plus en plus puissantes. Le premier réacteur à fusion de *George Paget Thomson* et *Moses Blackman* s'imposa. Les scientifiques se rendirent vite compte qu'il était impossible de recréer sur Terre les conditions pour la fusion de l'hydrogène. Ils remarquèrent cependant qu'il était possible d'arriver au même but en utilisant 2 des isotopes de l'hydrogène, le deutérium et le tritium. Bien qu'il soit impossible de recréer les conditions physiques du soleil, on peut tout de même créer un milieu propice à la fusion. C'est donc au cœur d'un tokamak, qui est en fait une chambre à vide que l'on produit cette réaction au sein d'un « plasma » qui est souvent qualifié de quatrième état de la matière.

Comme le plasma n'autorise que de faibles densités, il faut monter sa température afin « d'exciter » ses particules. Cette température s'élève jusqu'à 150 millions de degrés, soit près de 10 fois la température interne du Soleil. Pour parvenir à de telles températures, on utilise des ondes



radiofréquences (le même genre d'ondes que dans ton four micro-ondes). Il faut également confiner le plasma car n'importe quel matériau est désintégrer au contact d'une telle température. Le plasma est sensible à l'action des champs magnétiques. C'est cette propriété qui va permettre de le confiner. En effet, on enferme le plasma dans un champs magnétique formée à l'aide d'aimants supraconducteurs refroidis à des températures proches du zéro absolu. On referme le champ

magnétique sur elle-même pour former un tore. On appelle ce champ un champ magnétique toroïdal. Cette approche de la fusion est appelée confinement magnétique.

Il existe cependant une seconde approche de la fusion thermonucléaire sur Terre. Elle se nomme fusion par confinement inertiel. La fusion par confinement inertiel quand à elle n'utilise pas de plasma



mais de puissantes impulsions lasers. Contrairement à la fusion magnétique dont le but est d'utiliser une faible densité de combustible et de le faire brûler le plus longtemps possible, la fusion inertielle utilise une énorme densité de matière qui est brûler en quelques picosecondes (milliardième de secondes) par les impusions lasers. les premiers tests de la fusions inertielle sont réalisées dans dans instalations militaires

tel que le Laser MégaJoule où l'on simule l'explosion de bombes atomiques...

Qu'elle soit inrtielle ou magnétique, la fusion représente une source potentielle d'énergie propre presque illimité. Une solution de remplacement à la fission nucléaire source de déchets radioactifs pendant des millions d'année

### Tableau périodique des éléments chimiques

<p>groupe 1</p> <p>1 H Hydrogène</p> <p>2 Li Lithium</p> <p>3 Na Sodium</p> <p>4 K Potassium</p> <p>5 Rb Rubidium</p> <p>6 Cs Césium</p> <p>7 Fr Francium</p>																		<p>2 Be Béryllium</p> <p>4 Ca Calcium</p> <p>8 Sr Strontium</p> <p>12 Sr Strontium</p> <p>16 Ba Baryum</p> <p>20 Ra Radium</p>																		<p>3 Mg Magnésium</p> <p>6 Mg Magnésium</p> <p>10 Mg Magnésium</p> <p>14 Mg Magnésium</p> <p>18 Mg Magnésium</p>																		<p>4 Sc Scandium</p> <p>8 Sc Scandium</p> <p>12 Sc Scandium</p> <p>16 Sc Scandium</p> <p>20 Sc Scandium</p>																		<p>5 Ti Titane</p> <p>10 Ti Titane</p> <p>15 Ti Titane</p> <p>20 Ti Titane</p> <p>25 Ti Titane</p>																		<p>6 V Vanadium</p> <p>11 V Vanadium</p> <p>16 V Vanadium</p> <p>21 V Vanadium</p> <p>26 V Vanadium</p>																		<p>7 Cr Chrome</p> <p>12 Cr Chrome</p> <p>17 Cr Chrome</p> <p>22 Cr Chrome</p> <p>27 Cr Chrome</p>																		<p>8 Mn Manganèse</p> <p>13 Mn Manganèse</p> <p>18 Mn Manganèse</p> <p>23 Mn Manganèse</p> <p>28 Mn Manganèse</p>																		<p>9 Fe Fer</p> <p>14 Fe Fer</p> <p>19 Fe Fer</p> <p>24 Fe Fer</p> <p>29 Fe Fer</p>																		<p>10 Co Cobalt</p> <p>15 Co Cobalt</p> <p>20 Co Cobalt</p> <p>25 Co Cobalt</p> <p>30 Co Cobalt</p>																		<p>11 Ni Nickel</p> <p>16 Ni Nickel</p> <p>21 Ni Nickel</p> <p>26 Ni Nickel</p> <p>31 Ni Nickel</p>																		<p>12 Cu Cuivre</p> <p>17 Cu Cuivre</p> <p>22 Cu Cuivre</p> <p>27 Cu Cuivre</p> <p>32 Cu Cuivre</p>																		<p>13 Zn Zinc</p> <p>18 Zn Zinc</p> <p>23 Zn Zinc</p> <p>28 Zn Zinc</p> <p>33 Zn Zinc</p>																		<p>14 Ga Gallium</p> <p>19 Ga Gallium</p> <p>24 Ga Gallium</p> <p>29 Ga Gallium</p> <p>34 Ga Gallium</p>																		<p>15 Ge Germanium</p> <p>20 Ge Germanium</p> <p>25 Ge Germanium</p> <p>30 Ge Germanium</p> <p>35 Ge Germanium</p>																		<p>16 As Arsenic</p> <p>21 As Arsenic</p> <p>26 As Arsenic</p> <p>31 As Arsenic</p> <p>36 As Arsenic</p>																		<p>17 Se Sélénium</p> <p>22 Se Sélénium</p> <p>27 Se Sélénium</p> <p>32 Se Sélénium</p> <p>37 Se Sélénium</p>																		<p>18 Br Brome</p> <p>23 Br Brome</p> <p>28 Br Brome</p> <p>33 Br Brome</p> <p>38 Br Brome</p>																		<p>19 Kr Krypton</p> <p>24 Kr Krypton</p> <p>29 Kr Krypton</p> <p>34 Kr Krypton</p> <p>39 Kr Krypton</p>																		<p>20 Xe Xénon</p> <p>25 Xe Xénon</p> <p>30 Xe Xénon</p> <p>35 Xe Xénon</p> <p>40 Xe Xénon</p>																		<p>21 Rn Radon</p> <p>30 Rn Radon</p> <p>35 Rn Radon</p> <p>40 Rn Radon</p> <p>45 Rn Radon</p>																	
---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	---	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

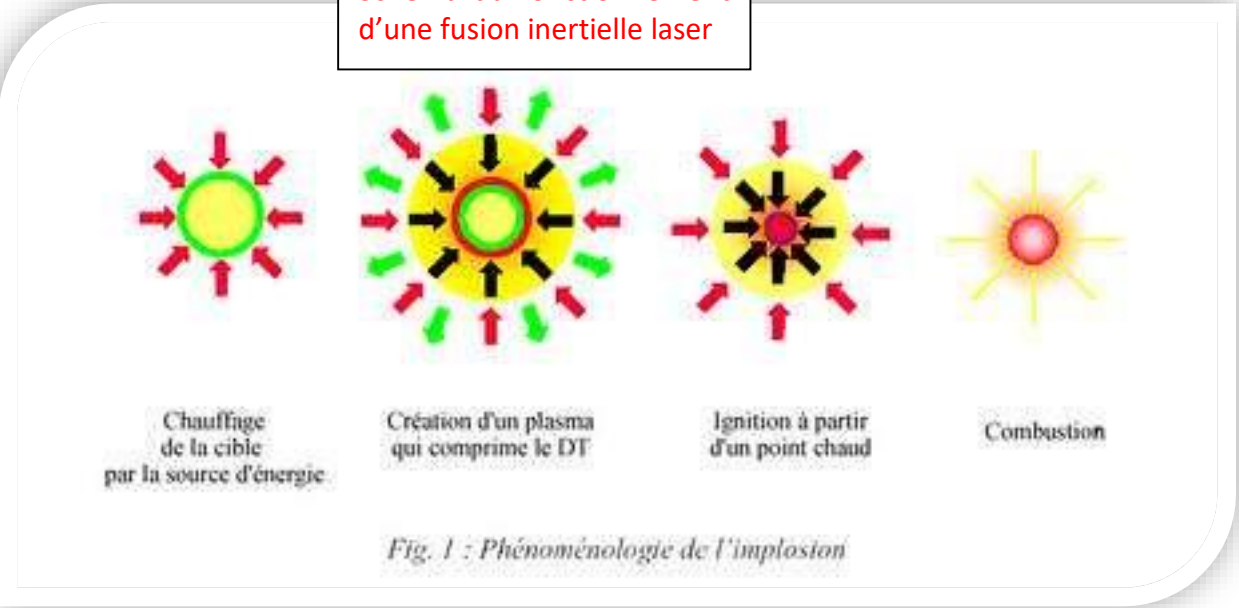
**notes**

- pour l'instant, les éléments 113, 115, 117 et 118 n'ont pas de nom officiel désigné par l'IUPAC.
- 1 kJ/mol = 96,485 eV.
- tous les éléments sont impliqués dans des états d'oxydation de 0.

**légal de configuration électronique**

138.9054	57	140.116	58	140.9076	59	144.242	60	(145)	61	150.36	62	151.964	63	157.25	64	158.9253	65	162.500	66	164.9303	67	167.259	68	168.9342	69	173.054	70
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb														
Lanthane	Cérium	Praséodyme	Néodyme	Prométhium	Samarium	Europium	Gadolinium	Terbium	Dysprosium	Holmium	Erbium	Thulium	Ytterbium														
(227)	89	232.0389	90	231.0368	91	238.0289	92	(237)	93	(244)	94	(243)	95	(247)	96	(247)	97	(251)	98	(252)	99	(257)	100	(258)	101	(259)	102
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No														
Actinium	Thorium	Protactinium	Uranium	Néptunium	Plutonium	Amercium	Curium	Berkélium	Californium	Einsteinium	Fermium	Mendelevium	Noérium														

Schéma du fonctionnement d'une fusion inertielle laser





## Bibliographie

- Activation neutronique*. (s.d.). Récupéré sur wikipedia.org:  
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Activation\\_neutronique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Activation_neutronique)
- Arnoux, R. (s.d.). *Le plus grand ensemble de monteurs au monde*. Récupéré sur iter.org:  
<https://www.iter.org/mag/4/33>
- Countries*. (s.d.). Récupéré sur iter.org: <https://www.iter.org/proj/Countries>
- Diagne, N. (2016, novembre 30). *Le diamant convertit les déchets nucléaires en batteries propres*. Récupéré sur SiecleDigital: <https://siecledigital.fr/2016/11/30/diamant-dechets-nucleaires-batterie/>
- frise chronologique*. (s.d.). Récupéré sur clubic.com: <https://www.clubic.com/energie-renouvelable/article-851159-1-iter-avenir-fusion-nucleaire-joue-france-tokamak.html>
- Fusion*. (s.d.). Récupéré sur iter.org: <https://www.iter.org/sci/Fusion>
- Fusion nucléaire*. (s.d.). Récupéré sur fr.wikipedia.org:  
[https://fr.wikipedia.org/wiki/Fusion\\_nucl%C3%A9aire#Histoire](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fusion_nucl%C3%A9aire#Histoire)
- Labaune, C. (s.d.). *La fusion par laser au seuil de la réalité*. Récupéré sur Pour la science:  
<https://www.pourlascience.fr/sd/physique/la-fusion-par-laser-au-seuil-de-la-realite-2219.php>
- la-chine-atteint-100-millions-de-degres-celsius-avec-un-reacteur-a-fusion-nucleaire*. (2018, 11 15). Récupéré sur siecledigital.fr: <https://siecledigital.fr/2018/11/15/la-chine-atteint-100-millions-de-degres-celsius-avec-un-reacteur-a-fusion-nucleaire/>
- makingitwork*. (s.d.). Récupéré sur iter.org: <https://www.iter.org/sci/makingitwork>
- Neutrons : dans quelles conditions peuvent-ils être dangereux ?* (s.d.). Récupéré sur futura science:  
<https://www.futura-sciences.com/sciences/questions-reponses/matiere-neutrons-conditions-peuvent-ils-etre-dangereux-3043/>
- Sacco, L. (s.d.). *Fusion contrôlée : après ITER voilà HiPER !* Récupéré sur futura-sciences.com:  
<https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/physique-fusion-controlee-apres-iter-voila-hiper-12817/>
- Sacco, L. (s.d.). *Fusion nucléaire : le CEA et le Japon préparent l'après-Iter*. Récupéré sur futura-sciences:  
<https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/physique-fusion-nucleaire-cea-japon-preparent-apres-iter-10020/>
- Tokamak*. (s.d.). Récupéré sur iter.org: <https://www.iter.org/mach/Tokamak>
- WEISSE, G. L. (s.d.). *energie-thermonucleaire*. Récupéré sur universalis.fr:  
<https://www.universalis.fr/encyclopedie/energie-thermonucleaire/3-la-fusion-par-confinement-inertiel/>
- Zaghet, C. (2018, novembre 15). *siecledigital.fr*. Récupéré sur <https://siecledigital.fr/2018/11/15/la-chine-atteint-100-millions-de-degres-celsius-avec-un-reacteur-a-fusion-nucleaire/>

## Lexique

---

- i **Énergie potentielle.** Énergie liée à une interaction, qui a le potentiel de se transformer en d'autres énergies, le plus souvent en énergie cinétique.
- ii **Isotope.** Sont les différents types d'atomes d'un même élément qui se distinguent seulement par leur nombre de neutrons. Les isotopes d'un même élément gardent en effet le même nombre de protons et d'électrons. Ils possèdent aussi les mêmes propriétés chimiques.
- iii **Force d'attraction nucléaire.** Elle est 100 à 1 000 fois plus forte que la force électromagnétique : elle agit comme une glue à l'intérieur des atomes, maintenant les protons et les neutrons confinés dans le noyau. Ces protons et ces neutrons sont eux-mêmes composés de particules encore plus élémentaires qui sont également retenus grâce à la force nucléaire forte. La force nucléaire faible est très peu intense : elle est environ 100 000 fois plus faible que la force nucléaire forte. Elle est notamment responsable de la radioactivité provoquant la rupture ou la mutation du noyau, alors que la force forte maintient l'unité du noyau.
- iv **Répulsion coulombienne.** La force électrique n'agit que sur des particules chargées, attirant celles qui sont de signe opposé et repoussant celles de même signe. Cette force agissante à « longue » distance permet aux électrons, porteurs d'une charge négative, d'être retenus autour du noyau chargé positivement. Les neutrons, ne possédant pas de charge, ne sont pas soumis à la force électrique.
- v **Confinement magnétique.** C'est une méthode de confinement utilisée pour porter une quantité de combustible aux conditions de température et de pression désirées pour la fusion nucléaire. De puissants champs électromagnétiques sont employés pour atteindre ces conditions. Le combustible doit au préalable être converti en plasma, celui-ci se laisse ensuite influencer par les champs magnétiques.
- vi **Atome.** Est le terme ultime de la division de la matière dans lequel les éléments chimiques conservent leur individualité. C'est la plus petite particule d'un élément qui existe à l'état libre ou combiné.
- vii **Radioactif.** La radioactivité est le phénomène physique par lequel des noyaux atomiques instables se transforment spontanément en d'autres atomes en émettant simultanément des particules de matière et de l'énergie.
- viii **Densité.** Rapport d'un corps entre sa masse volumique et la masse volumique d'un corps pris comme référence.
- ix **Ion.** Atome ou une molécule portant une charge électrique, parce que son nombre d'électrons est différent de son nombre de protons. On distingue deux grandes catégories d'ions : les *cations* chargés positivement, et les *anions* chargés négativement.
- x **Vortex.** Tourbillon creux qui apparaît dans un fluide en écoulement.
- xi **Tore.** Surface de révolution engendrée par un cercle qui tourne autour d'un axe situé dans son plan et ne passant pas par son centre (*syn.* anneau)
- xii **Conducteur.** Corps capable de laisser passer un courant électrique.
- xiii **Particule.** Très petite partie, infime quantité (d'un corps).
- xiv **Excité.** État d'un atome, ou d'une molécule, dont l'énergie est plus élevée que celle de l'état fondamental (État d'un atome, ou d'une entité moléculaire, correspondant à son niveau d'énergie le plus bas.).
- xv **Répulsion.** Phénomène suivant lequel deux corps ou deux molécules se repoussent mutuellement.
- xvi **Ionisant.** Qui produit des ions.
- xvii **Supraconductivité.** Désigne la propriété de certains matériaux de conduire parfaitement le courant électrique (sans aucune résistance) en générant d'importants champs magnétiques. Ce phénomène physique n'est atteint qu'à de très basses températures proches du zéro absolu (- 273,15°C).
- xviii **Niobium-titane.** Alliage de niobium et de titane, utilisé industriellement comme fil de supraconducteur de type 2.
- xix **Supercritique.** En chimie physique, on qualifie de fluide supercritique l'état de la matière soumise à une forte pression et à une forte température. On parle de fluide supercritique lorsqu'un fluide est chauffé au-delà de sa température critique et lorsqu'il est comprimé au-dessus de sa pression critique.
- xx **Zéro absolu.** Température la plus basse qui puisse exister.
- xxi **Effet Joule.** Effet de production de chaleur qui se produit lors du passage du courant électrique dans un conducteur présentant une résistance. Il se manifeste par une augmentation de l'énergie thermique du conducteur et de sa température.
- xxii **Résistif.** La résistivité d'un matériau, généralement symbolisée par la lettre grecque rho, représente sa capacité à s'opposer à la circulation du courant électrique.
- xxiii **Isotrope.** Un corps est dit isotrope lorsqu'il présente les mêmes propriétés dans toutes les directions.